

MODELO DE ESTIMACIÓN DE INDICADORES MORFOLÓGICOS ASOCIADOS A
CAMBIOS EN EL RÉGIMEN HIDROLÓGICO - CASO DE ESTUDIO RÍO SINÚ

JOSE DAVID PACHECO BARRIOS

TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL
ENFASIS RECURSOS HIDRICOS

DIRECTOR: HUMBERTO FABIÁN AVILA RANGEL. PHD.

UNIVERSIDAD DEL NORTE
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL MAESTRIA EN INGENIERÍA CIVIL
BARRANQUILLA

2015

Nota de aceptación:

Firma del Presidente del Jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Barranquilla, fecha:

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION.....	10
1. OBJETIVOS.....	12
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	12
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE	13
2.1. Antecedentes	13
2.2. Morfología fluvial	14
2.3. Modelos de variabilidad morfológica	17
2.4. Efectos de la presas.....	25
2.5. Antecedentes investigativos sobre el río Sinú.	26
3. GENERALIDADES	31
3.1. Localización de la zona de estudio.....	31
3.2. Características climáticas de la zona de estudio.....	33
3.3. Clasificación de registros por condición hidrológica.....	34
4. METODOLOGÍA APLICADA	37
4.1. Recopilación y análisis de Información hidrométrica.	38
4.2. Análisis de indicadores de cambios hidrológicos en las corrientes.	38
4.3. Análisis de indicadores de cambios morfológicos en las corrientes.....	39
4.4. Software MEANDER.	40
4.4.1. Sinuosidad.....	40
4.4.2. Distancia relativa entre dos cauces.....	41
4.4.3. Diferencia en la distancia relativa entre dos cauces.....	42
4.5. Modelos estadísticos para el análisis hidro-morfológico del cauce.	42
4.5.1. Selección del modelo.	43
4.5.1.4. Análisis de residuos.....	44
5. PROCESAMIENTO DE INFORMACION	46
5.1. Análisis de indicadores de cambio hidrológicos en las corrientes.....	46
5.1.1. Análisis general de cambio hidrológico para el río Sinú (1960-2011).....	46
5.2. Análisis de indicadores de cambio morfológicos en las corrientes.	50

5.3. Cálculo de variables geomorfológicas.....	53
5.3.1. Índice de Sinuosidad.	53
5.3.2. Factor de migración lateral.	55
5.3.3. Distancia relativa entre dos cauces.	57
5.3.3.1. Desplazamiento lateral sobre el río Sinú 1961-1981.	57
5.3.3.2. Desplazamiento lateral sobre el río Sinú 1981-1988.....	62
5.3.3.3. Desplazamiento lateral sobre el río Sinú 1988-1994.....	67
5.3.3.4. Desplazamiento lateral sobre el río Sinú 1999-2005.	72
5.3.3.5. Diferencia en la distancia relativa para el río Sinú (1960-2011).	81
6. ANÁLISIS DE INDICADORES HIDRO-MORFOLÓGICOS EN EL RÍO SINÚ.....	82
6.1. Variables hidro-morfológicas del río Sinú.	82
6.1.1. Variables morfológicas.....	82
6.1.2. Variables Hidrológicas.....	83
6.2. Registro de valores de comportamiento de variables hidromorfológicas.	84
6.3. Análisis de colinealidad entre variables.....	84
7. DISEÑO DE MODELOS ESTADÍSTICOS.....	87
7.1. Modelo lineal para el factor de migración lateral.....	87
7.1.1 Selección del modelo	87
7.1.2 Análisis de varianza	89
7.1.3 Análisis de residuos.....	90
7.1.4 Tasas de variación	91
7.1.5 Intervalos de predicción.....	92
7.2. Modelo de lineal para la sinuosidad.	92
7.2.1. Selección del modelo	93
7.2.2. Regresión lineal múltiple	94
7.2.3 Análisis de varianza	96
7.3. Modelo lineal para la iferencia de la distancia relativa	99
7.3.1. Selección del modelo	100
7.3.2 Regresión lineal múltiple	101
7.3.3. Análisis de varianza	103

7.3.4	Análisis de residuos.....	103
7.3.5	Tasas de variación	104
7.3.6.	Intervalos de predicción.....	106
7.4.	Modelo no lineal para el factor de migración lateral	106
7.5.	Modelo no lineal para la sinuosidad	108
7.6.	Modelo no lineal para la diferencia en la distancia relativa	109
7.7.	Selección del modelo	111
8.	VALIDACIÓN DE LOS MODELOS ESTADÍSTICOS SELECCIONADOS.....	112
8.1.	Indicadores de cambio hidrológico para el río Sinú (2006-2013).	112
8.1.1.	Pulsos de caudal altos para el río Sinú (2006-2013).	113
8.1.2.	Tasas de variación de caudal (2006-2013).....	115
8.2.	Indicadores de cambio morfológico para el río Sinú (2006-2013).....	116
8.2.1.	Caracterización geométrica del cauce.	116
8.2.2.	Factor de migración lateral	120
8.2.3.	Sinuosidad	122
8.2.4.	Diferencia en la distancia relativa	124
9.	ANÁLISIS DE RESULTADOS ESTADÍSTICOS.....	132
9.1.	Factor de migración lateral	132
9.2.	Sinuosidad	136
9.3.	Diferencia en la distancia relativa	140
10.	CONCLUSIONES	145
11.	BIBLIOGRAFIA.....	147
ANEXO 1:	.....	153
ANEXO 2:	.....	161
ANEXO 3:	.....	167
ANEXO 4:	.....	174
ANEXO 5:	.....	195
ANEXO 6:	.....	221
ANEXO 7:	.....	235

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Formas en planta de un río a partir la relación pendiente- caudal.....	15
Figura 2. Relaciones entre la forma en planta del cauce y la pendiente longitudinal.	16
Figura 3. Modelos de comportamiento para las curvaturas de un meandro.	18
Figura 4. Relación entre tasa de migración y parámetros geométricos de un canal.....	20
Figura 5. Método de extrapolación para nuevas posiciones de radios de curvatura.	22
Figura 6. Modelo hiperbólico para la estimación de la migración lateral.	23
Figura 7. Modelo de migración lateral generado por el software MEANDER.	24
Figura 8. Procesos de erosión y sedimentación dinámica en el río Sinú.	27
Figura 9. Migración lateral de un cauce.....	28
Figura 10. Desplazamiento frontal de meandros.	28
Figura 11. Cierre de un meandro.	29
Figura 12. Formación y cierre de meandros opuestos lateralmente.....	30
Figura 13. Localización general del área de estudio (Cuenca del río Sinú).....	31
Figura 14. Cuenca alta del río Sinú (Tramo de estudio).	32
Figura 15. Esquema metodológico a desarrollar en la investigación.	37
Figura 16. Estimación de la valle Sinuosidad de un cauce.	41
Figura 17. Distancia relativa para un meandro en un tiempo (t) y (t+1)	42
Figura 18. Análisis hidrológico para el río Sinú (1960-2011)	46
Figura 19. Pulsos altos de caudal para el río Sinú (1960- 2011).	47
Figura 20. Duración de pulsos altos de caudal para el río Sinú (1960- 2011).....	48
Figura 21. Grandes inundaciones sobre el río Sinú (1960- 2011).	49
Figura 22. Tasas de ascenso de caudal (1960- 2011).....	49
Figura 23. Tasas de descenso de caudal (1960- 2011).....	50
Figura 24. Evolución morfológica del río Sinú, en la etapa pre-embalse desde 1961 hasta 1994. ..	51
Figura 25. Evolución morfológica del río Sinú, en la etapa post-embalse desde 1999 hasta 2005. 52	
Figura 26. Comportamiento histórico de la Sinuosidad para el río Sinú.	54
Figura 27. Comportamiento anual del indicador (R_c/W).....	55
Figura 28. Comportamiento histórico del factor de migración lateral para el río Sinú.	56
Figura 29. Áreas de migración lateral río Sinú 1961-1981.....	58
Figura 30. Abscisas proyectadas sobre la forma en planta del río Sinú en 1961 y 1981.	60
Figura 31. Longitud de abscisas proyectadas sobre el río Sinú (1961-1981).	61
Figura 32. Diferencia en la distancia relativa sobre el río Sinú (1961-1981).	62
Figura 33. Áreas de migración lateral río Sinú (1981-1988).	63
Figura 34. Abscisas proyectadas sobre la forma en planta del río Sinú en 1981 y 1988.	65
Figura 35. Longitud de abscisas proyectadas sobre el río Sinú (1961-1981).	66
Figura 36. Diferencia en la distancia relativa sobre el río Sinú (1981-1988).	67
Figura 37. Áreas de migración lateral río Sinú (1988-1994).	68

Figura 38. Abscisas proyectadas sobre la forma en planta del río Sinú en 1988 y 1994.	70
Figura 39. Longitud de abscisas proyectadas sobre el río Sinú (1988-1994).	71
Figura 40. Diferencia en la distancia relativa sobre el río Sinú (1988-1994).	71
Figura 41. Áreas de migración lateral río Sinú (1999-2011).	72
Figura 42. Abscisas proyectadas sobre la forma en planta del río Sinú en 1999 y 2002.	74
Figura 43. Longitud de abscisas proyectadas sobre el río Sinú (1999-2002).	75
Figura 44. Diferencia en la distancia relativa sobre el río Sinú (1999-2002).	75
Figura 45. Abscisas proyectadas sobre la forma en planta del río Sinú en 2002 y 2004.	76
Figura 46. Longitud de abscisas proyectadas sobre el río Sinú (2002-2004).	77
Figura 47. Diferencia en la distancia relativa sobre el río Sinú (2002-2004).	78
Figura 48. Abscisas proyectadas sobre la forma en planta del río Sinú en 2004 y 2005.	79
Figura 49. Longitud de abscisas proyectadas sobre el río Sinú (2004-2005).	80
Figura 50. Diferencia en la distancia relativa sobre el río Sinú (2004-2005).	80
Figura 51. Comportamiento general del indicador diferencia en la distancia relativa (1960-2011).	81
Figura 52. Comportamiento de las tasas de variación de caudales sobre el río Sinú.	85
Figura 53. Colinealidad entre variables del modelo (tasa de ascenso y descenso de caudales).	86
Figura 54. Análisis de residuos para el modelo lineal del FML.	90
Figura 55. Diagrama de theil para el modelo lineal del FML.	91
Figura 56. Intervalos de predicción para el modelo lineal del FML.	92
Figura 57. Análisis de residuos para el modelo lineal de la sinuosidad.	97
Figura 58. Diagrama de theil para el modelo lineal de la sinuosidad.	98
Figura 59. Intervalos de predicción para el modelo lineal de la sinuosidad.	99
Figura 60. Análisis de residuos para el modelo lineal de la DDR.	104
Figura 61. Diagrama de theil para el modelo lineal de la DDR.	105
Figura 62. Intervalos de predicción para el modelo lineal de la DDR.	106
Figura 63. Modelo no lineal para el factor de migración lateral con comportamiento logístico ...	107
Figura 64. Modelo no lineal de la sinuosidad con comportamiento potencial.	108
Figura 65. Parámetros estadísticos del modelo no lineal para la sinuosidad.	109
Figura 66. Modelo no lineal para la diferencia en la distancia relativa entre dos cauces.	110
Figura 67. Intervalo de predicción del modelo no lineal para la diferencia en la distancia relativa.	111
Figura 68. Comportamiento hidrológico río Sinú (2006-2013).	113
Figura 69. Conteo de pulsos altos de caudal para el río Sinú (2006-2013).	114
Figura 70. Duración de los pulsos altos de caudal para el río Sinú (2006-2013).	114
Figura 71. Tasas de ascenso para el caudal del río Sinú (2006-2013).	115
Figura 72. Tasas de descenso para el caudal del río Sinú (2006-2013).	116
Figura 73. Imagen Landsat (2014) sobre el río Sinú.	117
Figura 74. Caracterización geométrica mediante software Meander para el río Sinú (2014).	118
Figura 75. Relación radio de curvatura y ancho del canal para el río Sinú en el año 2014.	119
Figura 76. Validación del modelo de regresión lineal para el factor de migración lateral.	121

Figura 77. Validación del modelo de regresión no lineal para el Factor de migración lateral.	122
Figura 78. Validación del modelo de regresión lineal para la sinuosidad.....	123
Figura 79. Validación del modelo de regresión no lineal para la Sinuosidad.	124
Figura 80. Superposición de imágenes Landsat río Sinú 2005-2014	125
Figura 81. Abscisas proyectadas sobre la forma en planta del río Sinú en 2005.....	126
Figura 82. Abscisas proyectadas sobre la forma en planta del río Sinú en 2014.....	127
Figura 83. Longitud de abscisas proyectadas sobre el río Sinú 2005-2014	128
Figura 84. Diferencia en la distancia relativa sobre el río Sinú 2005-2014.....	129
Figura 85. Validación del modelo de regresión lineal para la DDR.....	130
Figura 86. Validación del modelo de regresión no lineal para la DDR.	131
Figura 87. Diagramas de theil comparativos para los modelos del factor de migración lateral	133
Figura 88. Diagramas de predicción comparativos para los modelos del factor de migración lateral.	134
Figura 89. Diagramas de validación comparativos para los modelos del factor de migración lateral.	135
Figura 90. Diagramas de theil comparativos para los modelos de la sinuosidad	137
Figura 91. Diagramas de predicción comparativos para los modelos de la sinuosidad	138
Figura 92. Diagramas de validación comparativos para los modelos de la sinuosidad	139
Figura 93. Diagramas de theil comparativos para los modelos de la Diferencia en la distancia relativa.	141
Figura 94. Diagramas de predicción comparativos para los modelos de la DDR.....	142
Figura 95. Diagramas de validación comparativos para los modelos de la DDR	143

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coeficientes de la ecuación de cálculo para la erosión de fondo	21
Tabla 2. Registros históricos de indicadores climatológicos.....	35
Tabla 3. Clasificación de las fases del fenómeno ENSO (1950 – 2011).....	36
Tabla 5.Registro histórico de Sinuosidad para el río Sinú.....	53
Tabla 6. Sinuosidad media(S_m) para el río Sinú.....	54
Tabla 7. Registro histórico del factor de migración lateral para el río Sinú.....	56
Tabla 8. Variabilidad periódica del factor de migración lateral en el río Sinú.	57
Tabla 9. Áreas de migración lateral sobre el río Sinú (1961-1981).....	59
Tabla 10. Áreas de migración lateral río Sinú (1981-1988).....	64
Tabla 11. Áreas de migración lateral río Sinú (1988-1994).....	69
Tabla 12. Áreas de migración lateral río Sinú (1999- 2005).....	73
Tabla 13. Indicadores hidro- morfológicos sobre el río Sinú.	84
Tabla 14. Mejores subconjuntos para la regresión múltiple del factor de migración lateral.....	88
Tabla 15. Stepwise para el factor de migración lateral.	88
Tabla 16. Regresión lineal múltiple estimada para el factor de migración lateral (FML).	89
Tabla 17. Análisis de varianza para el modelo lineal FML.....	90
Tabla 18. Tasas de variación para el modelo lineal del FML.....	91
Tabla 19. Selección de mejores subconjuntos para la sinuosidad.....	93
Tabla 20. Stepwise para el modelo lineal de la sinuosidad	94
Tabla 21. Regresión lineal para la sinuosidad	95
Tabla 22. Regresión lineal para el modelo simplificado de la sinuosidad.....	95
Tabla 23. Análisis de varianza para la sinuosidad	96
Tabla 24. Tasas de variación para el modelo lineal de la sinuosidad.....	97
Tabla 25. Selección de mejores subconjuntos para la DDR.....	100
Tabla 26. Stepwise para el modelo lineal de la DDR.....	101
Tabla 27. Regresión para el modelo lineal de la DDR	102
Tabla 28. Regresión lineal para el nuevo modelo lineal de la DDR.....	102
Tabla 29. Análisis de varianza para el modelo lineal de la DDR.....	103
Tabla 30. Tasas de variación para el modelo lineal de la DDR.....	105
Tabla 31. Modelos estadísticos seleccionados.	112
Tabla 32. Valores de la relación R_c/W para las curvaturas del río Sinú en el año 2014.	120

INTRODUCCION

Los ecosistemas fluviales son sistemas dinámicos complejos en los cuales interactúan procesos geomorfológicos, físicos y biológicos, a través de un amplio rango de escalas espaciales y temporales. Analizar la interrelación de los procesos morfológicos e hidrológicos, es de gran utilidad en la planificación e intervención de ambientes fluviales.

El comprender la dinámica de sistemas fluviales intervenidos de forma antrópica, es fundamental para hacer frente a problemas socioeconómicos, como las inundaciones y el suministro de agua, así como para desarrollar estrategias más eficaces en la gestión del recurso hídrico.

Todas las presas alteran el sistema fluvial que se ubica aguas abajo de las mismas, tanto en los aspectos físicos como en los ecosistemas presentes en la cuenca. Los tensores ambientales asociados a la operación de un embalse, se atribuyen a la barrera biológica que se genera. Los reasentamientos poblacionales y el repoblamiento de especies acuáticas, son alternativas de mitigación frente a los impactos ambientales generados.

El río Sinú nace en el nudo del paramillo, sobre la cordillera occidental a una altura de 3700 msnm, atraviesa la cuenca de sur a norte en longitud de 437.9 km y desemboca en el mar caribe, específicamente sobre el delta de Tinajones, CVS (2004). Sin embargo, el río se encuentra intervenido de forma antrópica desde la década de los 90' por una presa hidroeléctrica, ubicada a 60 km al sur del municipio de Tierralta -Córdoba.

La dinámica morfológica del río Sinú en la etapa pre-embalse es activa, con patrones de alineamiento meándricos muy variables. Sin embargo, con la entrada en operación de la presa en 1999, la dinámica en los procesos morfológicos es menor. Lo anterior, incide en el comportamiento de los indicadores de cambio morfológico, tales como: la migración lateral del río, la sinuosidad y la diferencia en la distancia relativa.

La presente investigación surge por la necesidad de comprender los patrones de cambio morfológicos en ríos sinuosos, a partir de variables hidrológicas, hidráulicas y geomorfológicas, teniendo como caso de estudio el río Sinú con efecto del embalse de Urrá.

El análisis hidrológico del río Sinú, se realiza a través de una metodología estandarizada denominada IHA (índice de alteración hidrológica), Richter (1996). Con una recopilación de la serie de tiempo histórica de caudales no menor de 20 años, esta metodología consta del cálculo y análisis de índices de alteración hidrológica aguas abajo de los embalses y se ha consolidado en el medio al registrar su aplicación en cerca de 80 casos alrededor del mundo.

Las corrientes aluviales (ríos) son geoformas dinámicas sujetas a rápidos cambios en el modelado del cauce y la configuración del flujo, las características físicas de los cauces aluviales, tales como: la relación ancho/profundidad, el proceso de migración lateral y la sinuosidad, son afectados significativamente por las variaciones hidrológicas.

Para caracterizar los cambios en la dinámica morfológica, se propone evaluar la evolución morfológica del río Sinú, a través de aerofotografías e imágenes satelitales tipo Landsat, relacionando el comportamiento hidrológico y las variaciones de la forma en planta. La caracterización geométrica de la forma en planta del río Sinú, se realizara con ayuda del software MEANDER, Texas A&M University (2005).

Este documento propone una nueva metodología investigativa aplicada en el desarrollo de la ingeniería civil, con especial énfasis en la planificación del recurso hídrico, a partir de la aplicación de modelos estadísticos que analicen la dinámica fluvial, a través de los indicadores de alteración hidrológica y morfológica sobre el río Sinú, realizándose de esta forma un gran aporte en el área investigativa de la hidro- morfología en ríos que han sido intervenidos por presas.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un modelo de regresión para la estimación de indicadores morfológicos en ríos sinuosos a partir de variables hidrológicas, hidráulicas y geomorfológicas, teniendo como caso de estudio el río Sinú con efecto del embalse de Urrá.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar la variabilidad del régimen hidrológico presente en el río Sinú y sus implicaciones en el patrón de alineamiento del río antes y después de la operación del embalse de Urrá.
- Analizar el fenómeno de migración lateral en el río Sinú, a través de los procesos de erosión lateral y de fondo generadas en las curvaturas del río.
- Identificar variables hidrológicas, hidráulicas y/o morfológicas determinantes en los procesos migración lateral en los meandros.
- Desarrollar un modelo de regresión múltiple para estimar indicadores geométricos que definen la variabilidad morfológica del río.
- Validar la modelación estocástica de indicadores morfológicos del río Sinú a través variables hidrológicas.

2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

2.1. Antecedentes

A finales del siglo XIX el desarrollo de la era industrial trajo consigo la construcción de presas o embalses hidroeléctricos como una alternativa para la generación de energía. En la actualidad debido a los avances tecnológicos en las plantas de generación eléctrica y en los sistemas de transmisión de energía, muchos países permiten la construcción de plantas hidroeléctricas en lugares remotos, lejos de donde se utilizará la energía. Uno de los proyectos hidroeléctricos más grandes en el mundo, es la presa “Tres Gargantas” sobre el río Yangtze en China, diseñada para la generación eléctrica y para el control de grandes inundaciones, cuenta con una planta hidroeléctrica que genera alrededor de 18,200 megavatios y puede suministrar hasta una novena parte de la electricidad que China necesita. De igual forma, la presa Itapú sobre el río Paraná, entre Paraguay y Brasil, puede producir hasta 12,600 megavatios de energía, esta planta fue inaugurada en 1982 y suministra una cuarta parte de la que se necesita para Brasil y casi toda la energía que utiliza Paraguay.

Las presas, por sus características generan perturbación en la dinámica fluvial, cambiando el ciclo natural del río e interviniendo en sus procesos geomorfológicos, acompañados por una reducción de la biodiversidad mediante la destrucción del hábitat natural de muchas especies. Fue a partir de la década de 1950, que los ingenieros percibieron los efectos secundarios en la operación de las presas, antes de esta década existían pocas presas construidas y la escases de datos impedía los análisis sobre los sistemas fluviales.

Las primeras observaciones importantes sobre el comportamiento de los ríos intervenidos por las presas, se realizaron por Wolman (1967) y sus conclusiones fueron:

- A mayor escala, las descargas diarias de caudal pueden aumentar, permanecer iguales o disminuir una vez es construida la presa, al igual que las variaciones en el caudal, los cambios en la vegetación, en las tasas de sedimentación, en las precipitaciones o la combinación de estos factores influyen directamente en la agradación o degradación que experimenta un cauce.

- A escala local, los diferentes sitios a lo largo de un río pueden cambiar de maneras diferentes. Para los sitios aguas abajo de la Presa Garrison en el río Missouri (EE.UU.), se observó que algunos tenían secciones transversales agrandadas (ya sea por mayor anchura o profundidad mayor) y otros habían reducido sus secciones transversales.
- La respuesta del cauce en el tiempo puede cambiar de la degradación a la agradación después del cierre de la presa o incluso experimentar varios ciclos de erosión y sedimentación. Malhotra (1951) informó inicialmente, la rápida degradación que sufrió el río Indus en India, por efecto de la presa, seguido de una fuerte agradación durante 20 años.

En la actualidad, comprender la evolución de sistemas tan complejos como los ríos, es una área de vanguardia investigativa, en especial los encaminados a comprender el comportamiento de los ríos intervenidos de forma antrópica. Las relaciones entre la hidrología del flujo, la topografía y la morfología del cauce, son importantes para la comprensión de la evolución del paisaje, el hábitat acuático y también los procesos físico-químicos de materiales orgánicos e inorgánicos que se encuentran presentes en un sistema fluvial intervenido.

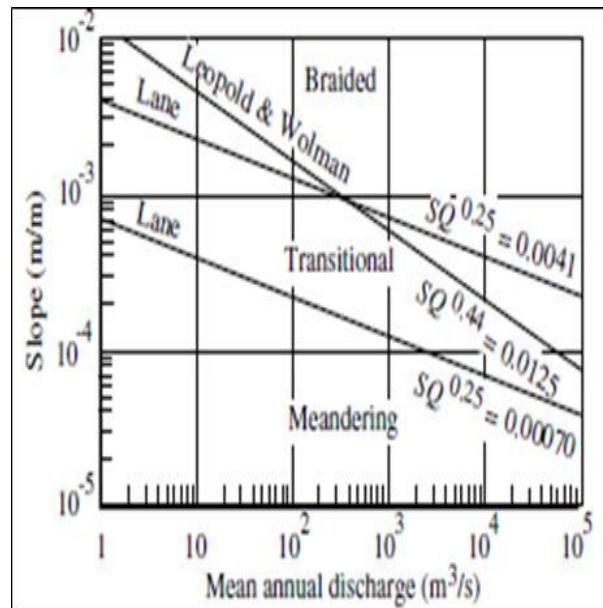
Varios modelos de predicción se han desarrollado con el objetivo de comprender el comportamiento de los ríos, modelos de estimación estocástica y de simulación numérica en el campo de morfología fluvial, han sido desarrollados por diferentes autores, entre los que se destacan: Duan, J.G & Julien, P.Y. (2010), Ashraf, F. & Liu, X. (2013), otras investigaciones van encaminadas a comprender el impacto de las presas en la vegetación riparia Tealdi, S. (2011). La complejidad de los meandros en sistemas fluviales, la variación en su comportamiento y su capacidad de autorregulación son abordadas por Hooke, J.M (2007).

Con la consecución de los modelos empíricos, estocásticos y matemáticos, se registran los más importantes avances investigativos en las áreas de la morfología fluvial, el efecto de las presas y la restauración de los cauces.

2.2. Morfología fluvial

La morfología fluvial se desarrolló a partir de la década de 1960, con estudios enfocados en la evolución del cauce a largo plazo y el registro de los cambios presentados a corto plazo en los ríos intervenidos. Los trabajos pioneros de morfolo-

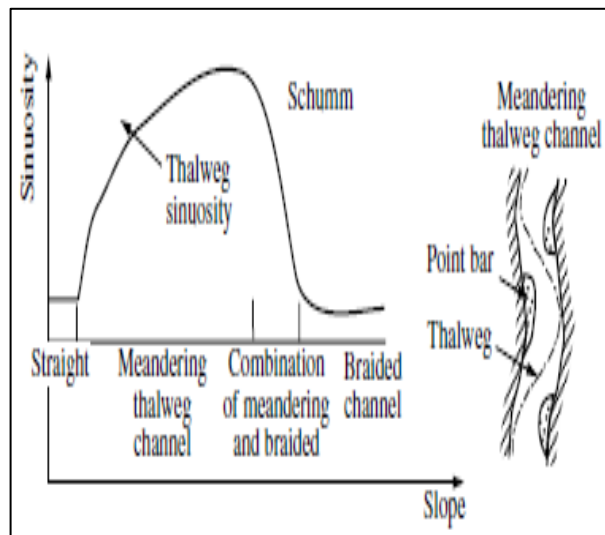
gía fluvial desarrollados por Leopold & Wolman (1957), innovaron con el desarrollo de la geometría hidráulica, al desarrollar una aproximación cuantitativa a los trabajos propiamente cualitativos de esa actividad. La Figura 1, muestra los patrones de comportamiento geométrico que presentan los ríos, estos varían dependiendo de la forma en planta del cauce, pueden ser: rectos, sinuosos, meándricos o trenzados.



Fuente: Leopold & Wolman ,1957.

Figura 1. Formas en planta de un río a partir la relación pendiente- caudal.

La geometría hidráulica permite describir la forma del cauce considerando como variable independiente el caudal. Algunas características hidráulicas de los ríos, como son: la profundidad, el ancho, la velocidad y la carga suspendida, se miden cuantitativamente y varían con el caudal en una sección transversal específica del río. Es imprescindible establecer la significancia de los límites de estabilidad para los patrones de cambio en el canal y la significancia relativa de los mismos en la determinación de los efectos sobre las inundaciones, Schumm (1968). La Figura 2, indica las formas en planta que se generan a partir del grado de sinuosidad y pendiente que presenta un cauce.



Fuente: Shumm, 1968.

Figura 2. Relaciones entre la forma en planta del cauce y la pendiente longitudinal.

Los estudios en la morfología de los ríos han intentado llegar a una teoría universal para describir el equilibrio dinámico en las corrientes naturales de los cauces. Una de las respuestas más comunes del cauce aguas abajo de la presa, es la incisión (degradación) del lecho a un ritmo muy superior al régimen natural durante un periodo de varios años con posterioridad a la construcción y que se extiende varios kilómetros, debido a la baja concentración de sólidos disueltos que posee el agua descargada por el embalse, se incrementa la capacidad de erosión en el lecho y las márgenes.

El proceso de degradación se va atenuando a medida que se alcanza un equilibrio morfológico, el cual puede manifestarse a través de una disminución en la pendiente longitudinal y un incremento de la rugosidad, lo que a su vez conlleva a la incapacidad del flujo para erosionar. La degradación puede generarse de forma irregular como consecuencia de la discontinuidad en el régimen de caudales por efecto de la operación del embalse, del cambio en la sección transversal del cauce, de la presencia o ausencia de vegetación o de la secuencia de capas sedimentarias del lecho, Williams & Wolman (1984).

El análisis geomorfológico implica describir patrones espaciales a partir de la forma en planta del cauce, con el registro de variaciones morfológicas obtenidas con el paso del tiempo y la comprensión de mecanismos o procesos que inducen al cambio en la morfología del río. Estudios recientes buscan determinar la complejidad natural de la morfología fluvial, a través de la delineación hidrodinámica en dos dimensiones de las formas terrestres y fluviales, esto conlleva a eliminar la

toma de decisiones subjetivas, disminuyendo el error en futuras predicciones en las alteraciones morfológicas, Wyrick J.R & Pasternack G.B. (2014).

2.3. Modelos de variabilidad morfológica

La migración lateral de un meandro, es el proceso por el cual un cauce se mueve dentro de su área de inundación disponible, la migración incluye el cambio lateral del canal, expresado normalmente en términos de distancia recorrida perpendicular a la línea central del canal.

Las diferentes propuestas investigativas han enlazado las características físicas del río a variables básicas independientes, correlaciones simples se podrían establecer entre el ancho del canal, el gradiente del canal y el tamaño de partícula, con el fin de caracterizar las condiciones antes y después de la construcción del embalse, Williams & Wolman (1984). Sin embargo, los procesos de erosión presentados en sistemas fluviales siguen asociados a la dinámica de los mismos, pudiendo ser atribuidos a dos procesos principalmente: incisión y migración lateral.

Por incisión, se entiende la erosión vertical del sustrato, la cual genera una profundización del canal. En cauces con alta sinuosidad, La tasa de erosión debido a la migración lateral está directamente vinculada con la cohesión de las orillas, en estos la erosión permanente en la orilla externa del meandro se asocia a una progresiva migración lateral del canal.

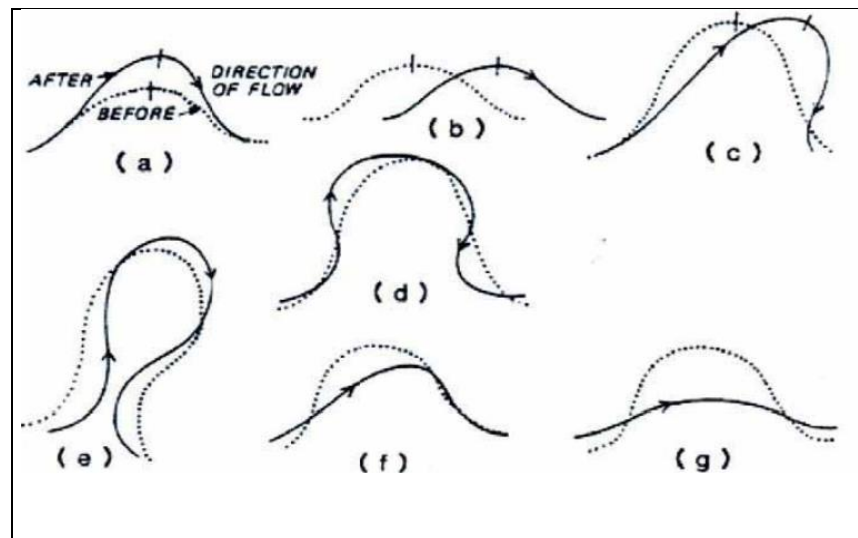
Aunque la erosión lateral es un proceso complejo, se han desarrollado varios métodos para predecir la tasa de erosión en el río. Se destacan los modelos para análisis bidimensional desarrollados por diferentes autores a partir de la velocidad del flujo, el transporte del sedimento, la geometría del canal, el caudal, y procesos relativos, entre los que se destacan: Ikeda et al (1981), Parker (1983), Odgaard (1987), Crosato (1990) y Mosselman (1992). No obstante, debido a que los resultados en los modelos matemáticos planteados, divergen entre ellos, ninguno ha alcanzado el nivel para ser un modelo válido genéricamente y de fácil aplicación.

Los enfoques actuales para predecir la migración del meandro hacen uso de la geometría, la hidrología y la geotecnia, entre otras características. Estos enfoques se pueden dividir en dos categorías: utilizando los mapas del tiempo y secuencia de extrapolación, Briaud (2001), Lagasse (2004) y los que utilizan ecuaciones empíricas asociando los parámetros del canal, tales como: el caudal, las característi-

cas de los materiales de la orilla y la geometría de la región del canal, Keady & Priest (1977), Nanson & Hickin (1983).

Las migraciones del canal tienen generalmente dos componentes (lateral y longitudinal), varios tipos de movimientos son originados con este proceso morfológico: a) La traslación, cuando la curva cambia de posición contra la corriente o río abajo sin la alteración de su forma básica. b) La rotación, cuando el eje de la curva cambia su orientación y c) La extensión, cuando la longitud del río aumenta. Lagasse (2004).

La Figura 3, muestra los procesos de migración lateral y las diferentes trayectorias que experimentan las curvaturas en los meandros.



Fuente: Lagasse, 2004

Figura 3. Modelos de comportamiento para las curvaturas de un meandro.

Las tasas de migración lateral en los ríos meándricos pueden ser correlacionadas con la proporción de curvatura en la curva del meandro, Bagnold (1960), Hickin & Nanson (1984). La tasa de erosión es una función mayormente del radio de curvatura con el ancho del río; también depende de la altura de la orilla en la curva externa, la potencia de la corriente y un coeficiente que representa la resistencia a la migración del canal.

$$T.E = 2.5M \frac{W}{R} \quad ; \frac{R}{W} > 2.5 \quad (1)$$

$$T.E = 0.67M \left(\frac{R}{W} - 1 \right) ; \frac{R}{W} < 2.5 \quad (2)$$

Esta fórmula es de carácter empírico y relaciona la tasa de erosión, (T.E.), con las características geométricas de la curva (el radio R por el eje de la curva y la anchura W medida en los puntos de inflexión) mediante un factor, M, que tiene en cuenta las características del material del margen y la potencia del flujo.

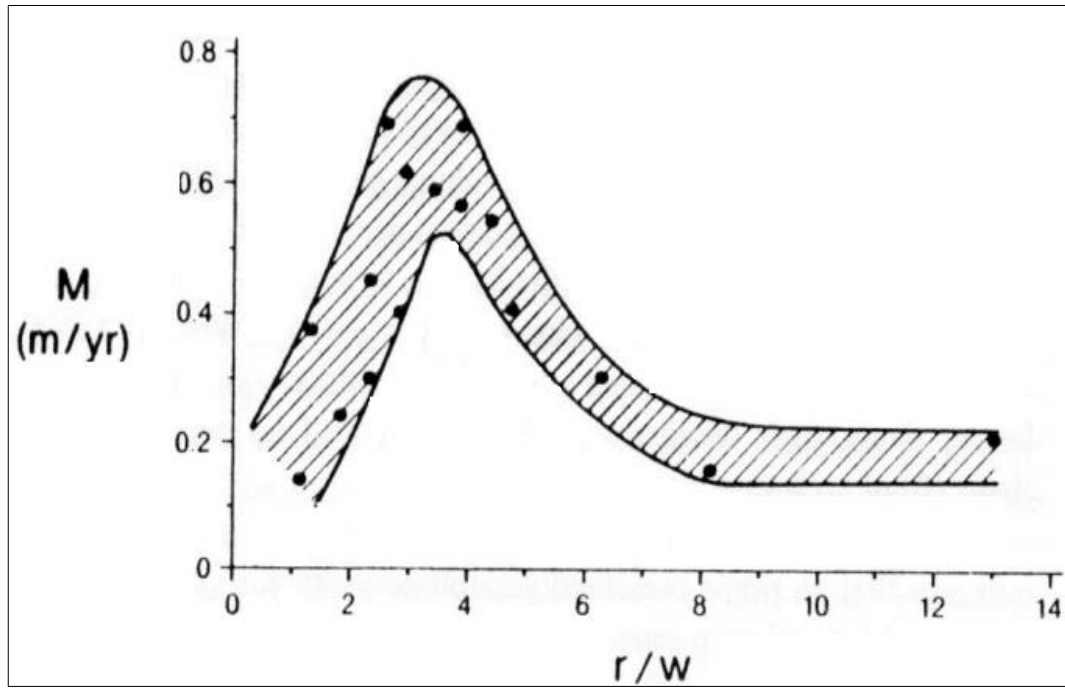
$$M_{2.5} = \frac{\Omega}{h_{ob}Y_b} \quad (3)$$

$$\Omega = YQ_5i \quad (4)$$

$$Y_b = f(D) \quad (5)$$

Donde M=tasa de erosión de la orilla [m/año]; $M_{2.5}$ =tasa máxima de erosión de la orilla (m/yr); Ω =potencia total de la corriente [Watts/m]; h_{ob} =altura de la orilla externa (m); Y_b =resistencia al coeficiente de migración del canal (N/m^2); Q_5 =caudal con periodo de retorno de cinco años.

De los datos analizados por Hickin & Nanson en 1984, se infiere que las máximas tasas de migración, tienen lugar cuando la relación entre el radio de curvatura y el ancho del canal (R/W) es de 2.5. Cuando la relación es menor, la tasa decrece rápidamente y cuando la relación entre el radio de curvatura y el ancho del canal (R/W) es mayor de 2.5, el descenso es más lento. La Figura 4, indica el comportamiento del factor de migración en relación a características geométricas del cauce. Dado que, los puntos de datos son muy dispersos y la mejor línea de ajuste no es obvia, se ilustra el área de comportamiento ideal.



Fuente: Hickin & Nanson, 1983

Figura 4. Relación entre tasa de migración y parámetros geométricos de un canal.

Por otro lado, la geometría no es el único factor que afecta la migración del meandro, otros factores importantes, tales como: la velocidad y las propiedades del suelo fueron ignorados en el análisis de Hickin y Nanson. Sin embargo, los datos se ajustan a las siguientes relaciones:

$$M.R \left(\frac{m}{year} \right) = 0.2 \frac{R_c}{W} \quad ; \frac{R_c}{W} < 3 \quad (6)$$

$$M.R \left(\frac{m}{year} \right) = 2.0 \left(\frac{R_c}{W} \right)^{-1} \quad ; \frac{R_c}{W} \geq 3 \quad (7)$$

Donde M.R es la tasa de migración normalizada, R_c es el radio de curvatura y W es el ancho del canal.

En la migración lateral no solo converge el análisis de la potencia del caudal en sus márgenes. Varias formulaciones empíricas, han sido diseñadas para analizar el comportamiento erosivo en el fondo del cauce, especialmente en las curvaturas del meandro, tales como: Thorne (1983), Altunin (1962) y USACE (1994).

Todas las fórmulas tienen una estructura del tipo:

$$\frac{h_{\text{curva}}}{h_{\text{recta}}} = a - b * \ln\left(\frac{R_c}{W} - c\right) \quad (8)$$

Donde h_{curva} es el calado máximo en la curvatura del meandro y h_{recta} es el calado en la recta de aproximación a la curva, los coeficientes a , b y c dependen de datos ajustados por cada autor, R_c es el radio de curvatura y W el ancho del meandro.

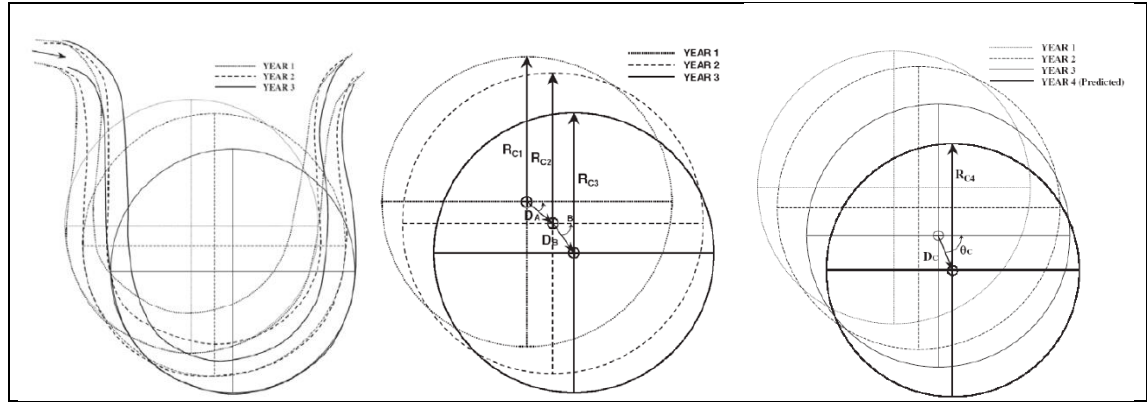
Tabla 1. Coeficientes de la ecuación de cálculo para la erosión de fondo

Autor	a	b	c
Thorne	2.07	0.19	2
Altunin-1	3.73	0.18	0
USACE- Arenas	3.376	0.66	0

La ecuación de Thorne, se obtiene a partir de los datos de curvas de varios ríos y de datos de laboratorio, su rango de aplicación son curvas con una relación R_c/W mayor que 2. La fórmula de Altunin-1 se aplica a curvas con relaciones de R_c/W comprendidas entre 2 y 6.

La fórmula de USACE se obtiene a partir de los datos de Thorne (1983) y Steven & Nordin (1987), los resultados obtenidos a partir de esta fórmula son conservadores ya que únicamente el 5% de los datos utilizados son mayores que los obtenidos con las otras ecuaciones.

Para analizar la problemática de cambios incrementales en los canales, se estableció una metodología para la predicción de migración lateral en ríos. Basados, únicamente en el análisis de fotografías aéreas y mapas de meandros, Lagasse (2004). La metodología consiste, en determinar los círculos que más se ajustan a la curvatura del cauce, en dos momentos de tiempo diferentes, se determina el centro y la magnitud del radio de curvatura. Posteriormente, se extrapolan las distancias linealmente, obteniéndose de esta forma el nuevo incremento en la migración del cauce. La Figura 5, representa las nuevas posiciones generadas, a partir de la extrapolación de puntos, el radio de curvatura no tiene una dirección específica. Sin embargo, si el radio de curvatura se está contrayendo, entonces la tasa para el radio de curvatura "extrapolada" es negativa o viceversa, de ahí la importancia de cuantificar la magnitud del vector resultante.



Fuente: Lagasse, 2004

Figura 5. Método de extrapolación para nuevas posiciones de radios de curvatura.

Este método es bueno en el sentido que da una primera estimación. Sin embargo, presenta algunas limitaciones: Se asume una tasa constante migración en la extrapolación, que puede ser válido sólo cuando la condición de flujo en el período predicho es el mismo del registro histórico, el suelo no cambia y el periodo previsto es corto.

La realidad demostró que las situaciones ideales como la planteada con antelación, pocas veces suceden. De igual forma, al presentarse una gran inundación, los valores de predicción son alterados considerablemente, incluso bajo la misma condición de flujo, un cambio en el suelo también puede convertir la tendencia a un valor diferente.

Investigaciones enfocadas en determinar el comportamiento de la socavación sobre los pilares de un puente, se realizan mediante el cálculo de la tasa de erosión inicial y la profundidad máxima de socavación, el método aplica un modelo hiperbólico, y se perfeccionó mediante la sustitución de la profundidad de socavación con la distancia de migración al margen, Briauds (2004).

El modelo hiperbólico propuesto para la estimación de la migración lateral está dado por:

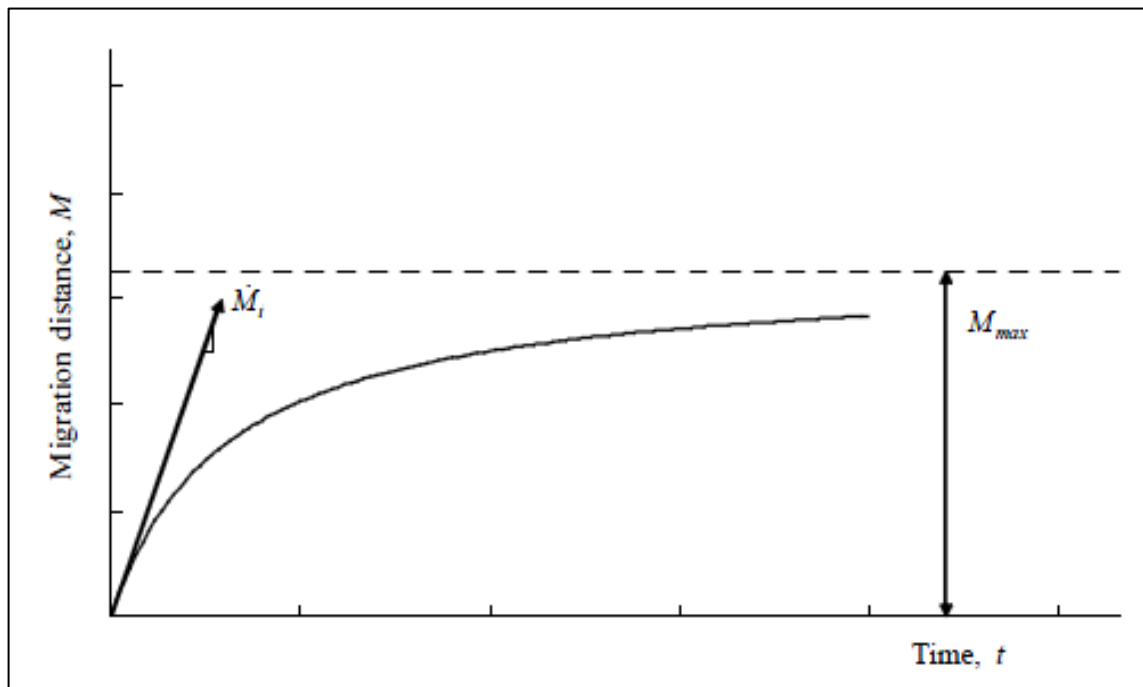
$$M = \frac{t}{a+bt} \quad (9)$$

$$\frac{1}{a} = \lim_{t \rightarrow 0} \left(\frac{M}{t} \right) = M_i \quad (10)$$

$$\frac{1}{b} = \lim_{t \rightarrow \infty} M = M_{max} \quad (11)$$

Donde M es la distancia de desplazamiento lateral, t es el tiempo, a y b son dos constantes del modelo, la distancia aumenta rápidamente, en respuesta al incremento en la potencia del flujo en la etapa inicial, la tasa disminuye gradualmente a medida que la longitud del río incrementa y la fricción aumenta, los parámetros a y b , son inversos a la tasa de erosión inicial M_i y a la tasa de erosión máxima M_{max} , que es la distancia máxima cuando el río alcanza su equilibrio.

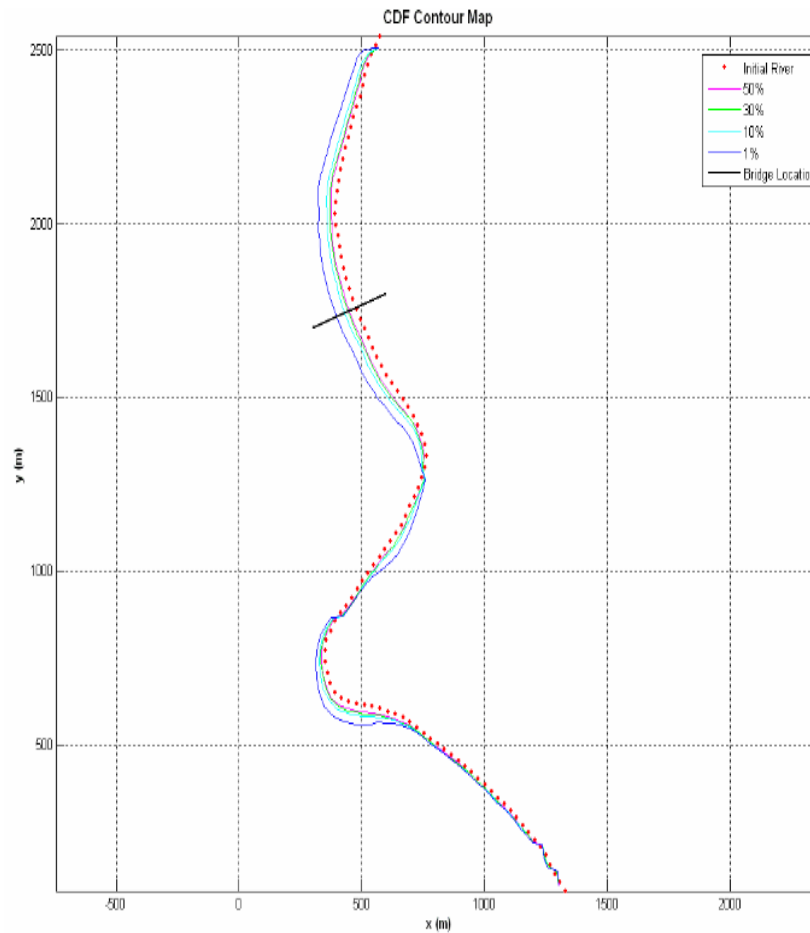
El modelo hiperbólico se utiliza para simular la respuesta no lineal de los suelos en el campo migración- tiempo. Como se observa en la Figura 6, a y b tienen un significado físico fácil de visualizar: a es el inverso del módulo tangente inicial, M_i y b es el inverso del valor M_{max} , cuando el tiempo tiende al infinito



Fuente: Briaud ,2005

Figura 6. Modelo hiperbólico para la estimación de la migración lateral.

Los métodos anteriormente expuestos, fueron compilados en el programa *MEANDER* desarrollado en el año 2005 por Texas A&M University. El modelo tiene un especial énfasis en el estudio geométrico del cauce, al cual se le determina de manera automática el radio de curvatura que mejor ajusta la forma en planta del río, y posteriormente aplica el método hiperbólico para determinar el factor de migración lateral máximo M_{max} . La Figura 7, indica el resultado del análisis de migración lateral presentado por el software *MEANDER*, basado en la forma en planta del río, genera pronósticos de migración para diferentes periodos de tiempo.



Fuente: Briaud ,2005

Figura 7. Modelo de migración lateral generado por el software MEANDER.

Modelos recientes aplicados a la variabilidad morfológica, indican la relevancia del radio de curvatura en la definición de los cambios morfológicos de un cauce. La relación radio de curvatura y el ancho del canal (R/B) y la relación profundidad del flujo y el caudal (H/Q), son utilizadas para conocer los efectos del sedimento en las curvaturas, a través de un sistema de redes neuronales artificiales (RNA), Kashyap, S. et al (2012). Otros estudios, examinan la influencia del radio de curvatura y la topografía en la generación de corrientes secundarias propias de sistemas meándricos, los resultados calculados indican que los cambios en la dirección del flujo desde el interior hasta el exterior de la curva, están inducidos por la topografía y no por un flujo secundario accionado por la curvatura. Esta comprensión de los impactos relativos de la curvatura y la topografía mejora la comprensión de las corrientes secundarias y la estructura de flujo en meandros, lo que contribuye al diseño de canales más estables, Chen, D &. He, L. (2013).

2.4. Efectos de la presas

América del Sur ha tenido en los últimos 30 años un aumento considerable en la construcción de proyectos hidroeléctricos. En 1998 se contabilizaban 979 obras en Sudamérica, de las cuales 646 se ubican en Brasil, WCD (2013). Sin embargo, los estudios enfocados a evaluar las modificaciones presentadas aguas abajo de las presas en los grandes ríos tropicales, no son tan frecuentes como en regiones templadas, Latrubesse et al (2005).

Los embalses son vitales para garantizar el suministro de agua y el control de las inundaciones. Sin embargo, generan cambios en los procesos fluviales aguas abajo de los ríos, los cambios dominados por cargas de sedimentos reducidos y magnitud de crecientes más bajas, pueden ser significativos, Petts, G. & Gurnell., A. (2013). Esta dinámica fluvial, se encuentra asociada con los cambios geomorfológicos presentados en la geometría física del cauce y con los cambios en el régimen hidrológico, uno de los principales efectos de los embalses es la transformación del régimen hídrico aguas abajo, los cuales transforman los periodos estacionales de los ríos, sus caudales mínimos y máximos generando así un régimen regulado post-embalse.

La morfología de un río representa la respuesta del mismo a las entradas de masa (caudal líquido y sólido) y energía, definida por la pendiente del valle sobre el que discurre el cauce, Fernández Yuste (2011). El río va ajustando esta energía con la forma en planta, dibujando curvas y meandros, o conformando una sucesión de saltos y pozas en la búsqueda continua de un equilibrio entre la pendiente disponible y el caudal a transportar.

Los efectos de la presa “Tres gargantas” sobre el río Yangtze, indican alteraciones en el régimen hídrico estacional, los cuales dependen de la tasa de almacenamiento y el caudal liberado, esto conlleva a un régimen muy fluctuante. Por otra parte, existen variaciones en las tasas de transporte de sedimento, con un fuerte proceso abrasivo en el primer tramo aguas debajo de la presa. Por último, se dificulta su interacción hidráulica y ambiental con el lago Poyang en China, Hua Guo, et al. (2012).

Por otra parte, los tensores ambientales negativos o efectos negativos por la operación de las presas, especialmente los relacionados con la regulación en la carga de sedimentos, han sido mitigados en parte, por un nuevo sistema implementado sobre la presa Xiaolangdi, ubicada en el río amarillo de China. El sistema de regulación para sedimentos, es conocido como sistema de modulación de sedimentos

de agua (WSM) y ha jugado un papel vital en la regulación de sedimentos y su descarga al mar. El WSM produce cerca del 50 % del sedimento anual al mar, de los cuales el 60 % proviene de sedimentos gruesos transportados desde el lecho del río. El WSM también conduce a un intenso lavado del lecho en la parte baja del río, lo que aumenta la capacidad de transporte y reduce el riesgo de inundaciones, Yu Yonggui, et al. (2013).

A pesar, de la existencia de múltiples metodologías que se enfocan en el análisis de regímenes de caudales, son pocas las experiencias registradas que aplican directamente al contexto colombiano, dadas las limitaciones de información existentes, las particularidades de los problemas de contaminación hídrica del país, el desconocimiento del ciclo de vida de la gran variedad de especies existentes en los ecosistemas de agua dulce, los problemas socio-económicos de una buena parte de las comunidades ribereñas, las limitaciones de las autoridades ambientales y la falta de aplicación de mecanismos de planeación y gestión del territorio, entre otras.

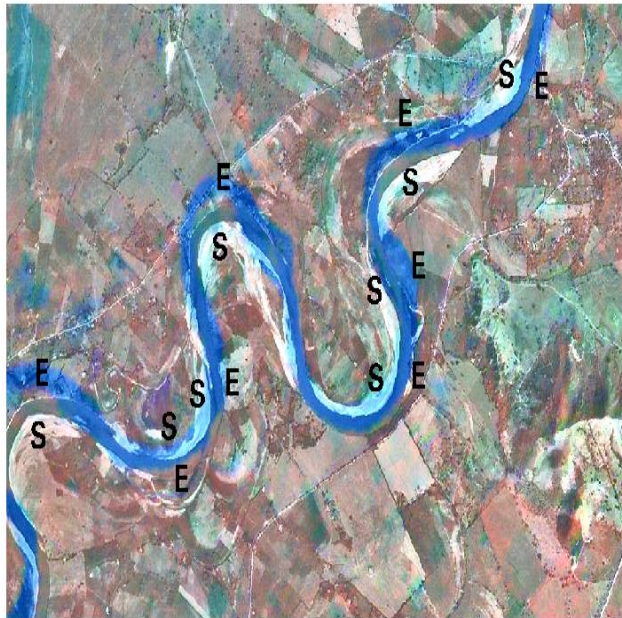
En el caso de proyectos de generación hidroeléctrica, caracterizados por fluctuaciones súbitas de los caudales en la corriente, existe una urgente necesidad de compatibilizar, tanto como sea posible, la operación de estas centrales hidroeléctricas, con criterios ambientales y geomorfológicos.

2.5. Antecedentes investigativos sobre el río Sinú.

Se destaca la investigación desarrollada por la Universidad del Norte, a través del Instituto de Estudios Hidráulicos y Ambientales – IDEHA y la Corporación Autónoma del Valle del río Sinú y San Jorge – CVS en el año 2005, teniendo en cuenta los procesos de erosión lateral presentados en el municipio de Tierralta. La investigación cuyo objeto fue “Estudios y diseños de las obras de ingeniería para la protección contra la erosión lateral causada por el río Sinú en Tierralta –Córdoba”, establece entre otros aspectos: que el río Sinú es un cauce de una alta dinámica fluvial, la cual se encuentra influenciada por la construcción y puesta en operación del embalse multipropósito Urra.

La dinámica morfológica y fluvial se evidencia por su sistema sinuoso o meándrico en el cual se presentan varios procesos dinámicos del cauce así: a) Frentes de sedimentación y erosión, b) desplazamiento lateral, c) desplazamiento frontal, d) cierre de meandros y e) Formación de meandros opuestos. IDEHA (2005).

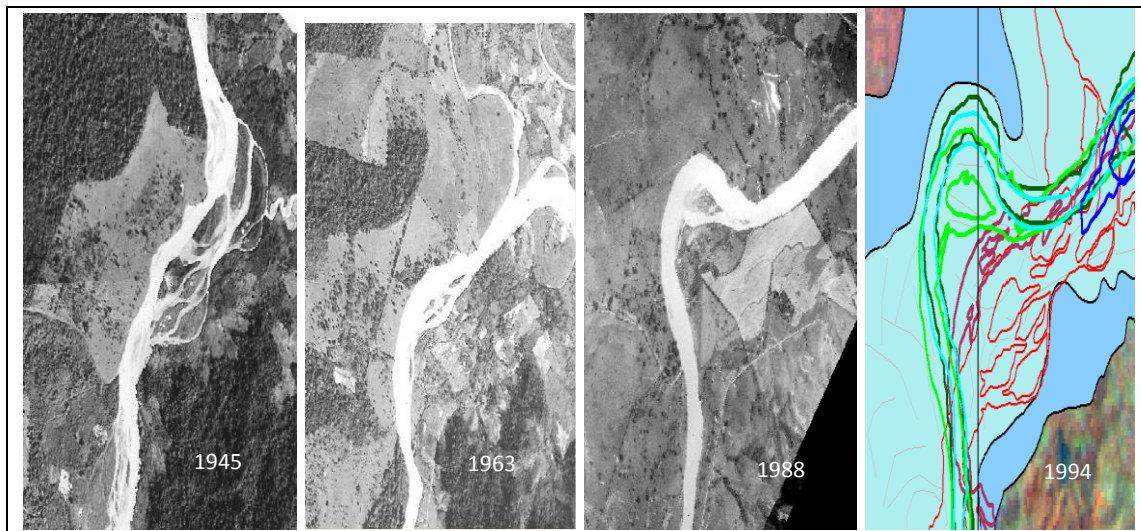
- *Frentes de erosión y sedimentación:* Se presentan dos procesos simétricos de erosión y sedimentación de materiales. En la Figura 8, se observa los efectos de la dinámica del río Sinú, al generar islas de sedimentos y zonas de socavación en las curvas, (E) proceso erosivo y (S) áreas de sedimentación.



Fuente: IDEHA, 2005

Figura 8. Procesos de erosión y sedimentación dinámica en el río Sinú.

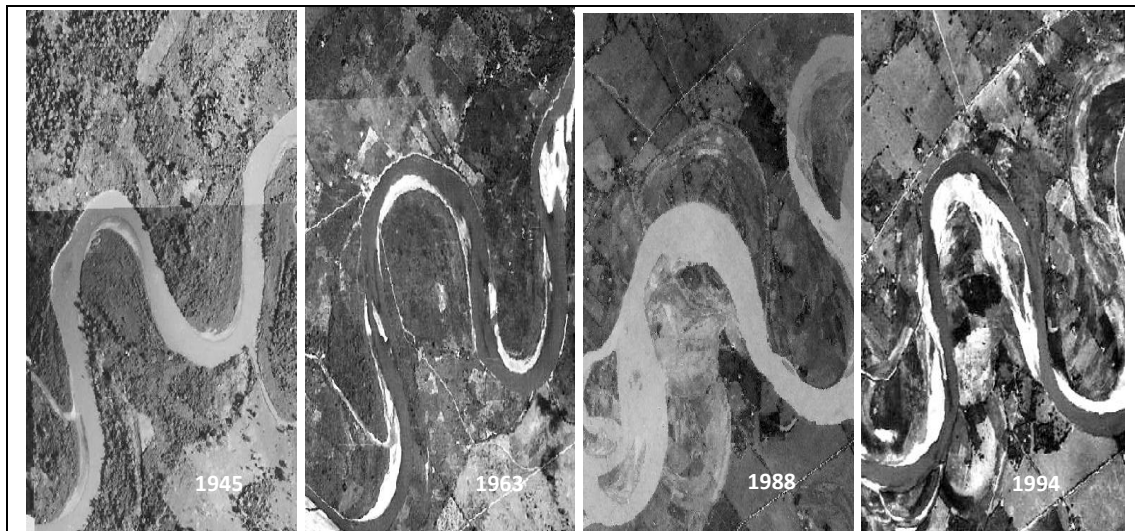
- *Desplazamiento lateral:* La formación de un meandro se debe a los procesos anteriormente explicados de erosión y sedimentación fluvial. La Figura 9, indica como el río Sinú va migrando lateralmente, ampliando su cauce de divagación reciente y modificando su trayectoria.



Fuente: IDEHA, 2005

Figura 9. Migración lateral de un cauce

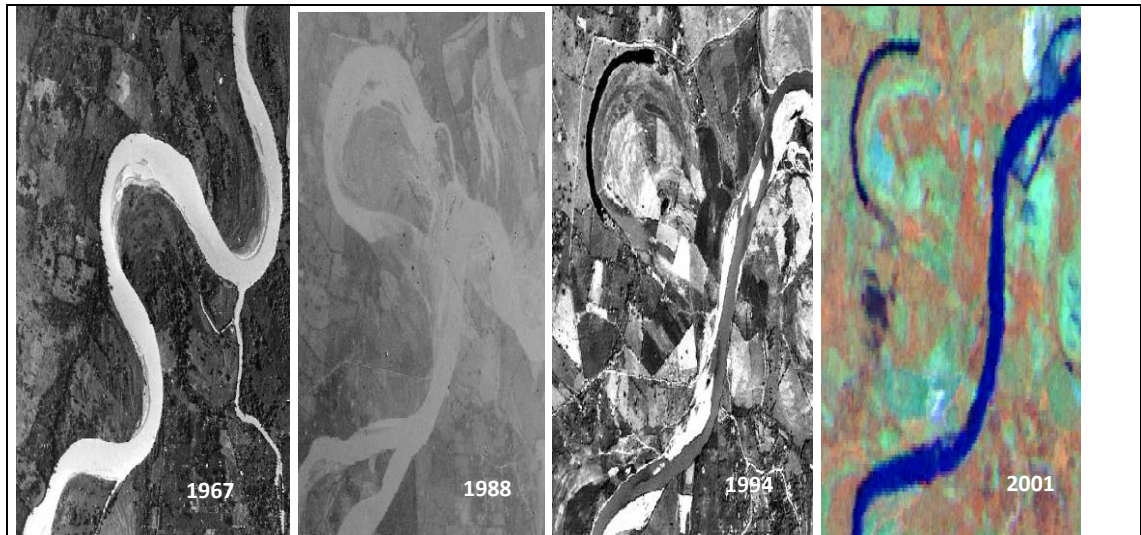
- *Desplazamiento frontal:* Representa el empuje de los meandros frontalmente o hacia delante hasta el cierre y la pérdida del meandro. En la Figura 10, se observa el comportamiento del meandro, el cual debido al proceso de desplazamiento frontal genera grandes áreas de sedimentación, forzando el cauce al cierre y abandono del meandro.



Fuente: IDEHA, 2005

Figura 10. Desplazamiento frontal de meandros.

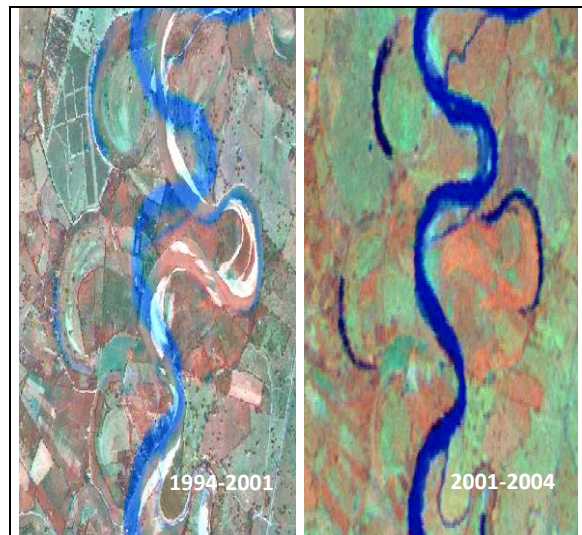
- *Cierre y abandono de meandros:* Ante el avance lateral y frontal junto con los procesos de erosión y sedimentación los meandros de los ríos evolucionan hasta cerrarse y quedar abandonados. La Figura 11, indica el proceso de abandono de meandros.



Fuente: IDEHA, 2005

Figura 11. Cierre de un meandro.

- *Formación de meandros opuestos:* La migración de meandros laterales y frontales acompañado con el cierre y abandono de estos, produce efectos de formación de nuevos meandros opuestos lateralmente a ellos. En la Figura 12 se observa el proceso de cierre del meandro, posiblemente generado por una fuerte sedimentación del lecho y la generación de un nuevo cauce lateral.



Fuente: IDEHA, 2005

Figura 12. Formación y cierre de meandros opuestos lateralmente.

La caracterización morfológica realizada sobre el río Sinú, ha sido el punto de partida de la presente investigación. De igual forma, la investigación se sustenta en estudios hidrológicos con criterios ambientales desarrollados con antelación. Se destaca el implementado sobre río Sinú, el cual analiza el concepto de caudal ecológico a través de la metodología (IHA) de regímenes de caudales, la frecuencia y duración de los pulsos de caudal, así como, las alteraciones en los máximos y mínimos, que modifican el balance competitivo, disminuyen la tolerancia al estrés de los microorganismos y no favorecen los procesos de colonización de las plantas. Lo cual afecta directamente los ciclos de vida de las plantas, los intercambios de nutrientes entre el río y su planicie de inundación, los ciclos reproductivos de las aves menores y disminuye la disponibilidad de suelo mineral, Vélez (2009).

Los antecedentes investigativos sobre la cuenca del río Sinú, se enfocan en determinar el caudal ecológico sobre el río Sinú, no analizan las variaciones hidrológicas con enfoque hidrodinámico y morfológico; Siendo este documento un avance significativo en el estado del conocimiento de la dinámica fluvial, en la presente investigación se propone generar varios modelos de estimación de indicadores morfológicos asociados a cambios en el régimen hidrológico, que permitan comprender y generar pronósticos de comportamientos en cauces intervenidos de forma antrópica, realizándose de esta forma un gran aporte en el conocimiento de la dinámica hidro- morfológicos de los ríos que han sido intervenidos por presas.

3. GENERALIDADES

Los aspectos generales del área de influencia, su localización, las características climáticas e información hidrométrica, se detallan a continuación:

3.1. Localización de la zona de estudio.

El río Sinú nace en el nudo del Paramillo, en la cordillera Occidental a 3700 msnm, atraviesa la cuenca de sur a norte en un longitud de 437.9 km y desemboca en el mar Caribe, en el Delta Tinajones, CVS (2004). Desde el año 1996, la empresa multipropósito URRÁ S.A. inicia la desviación del río Sinú en la angostura de Urrá y desde el 15 de febrero del año 2000 se inició la operación de la central hidroeléctrica URRÁ S.A. En la figura 13, se observa la cuenca del río Sinú está localizada al nordeste de Colombia, específicamente en la región del Caribe y cuenta con una extensión de 13952 km² de la cual el 93% pertenece al departamento de Córdoba, el 6% a Antioquia y el 1% a Sucre.

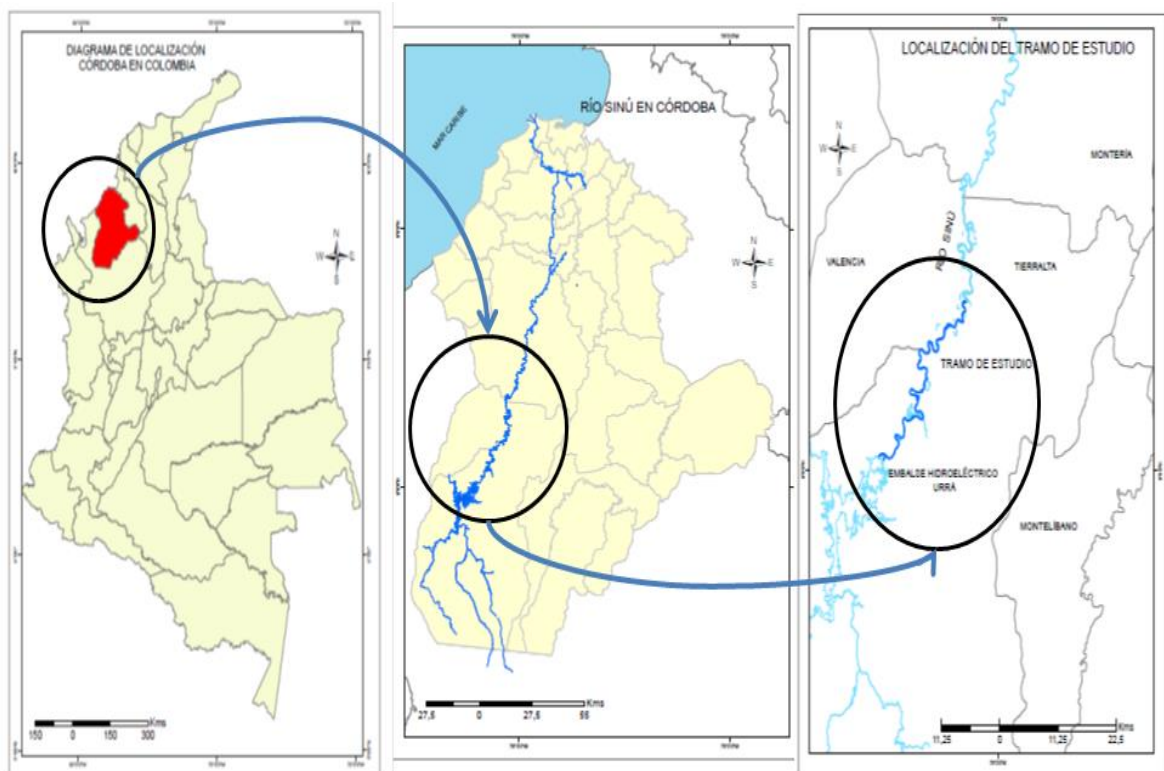


Figura 13. Localización general del área de estudio (Cuenca del río Sinú).

La Figura 14, indica el tramo de estudio perteneciente al río Sinú, el cual posee una longitud aproximada de 62 km y va desde el punto de descarga de la hidroeléctrica URRÁ S.A, ubicado a una altura de 69 m.s.n.m en la angostura de Urrá y a 100 metros de la estación hidrométrica “Puente Pacheco”, hasta la estación hidrométrica “Río Nuevo” que posee una altura de 36.13 m.s.n.m.

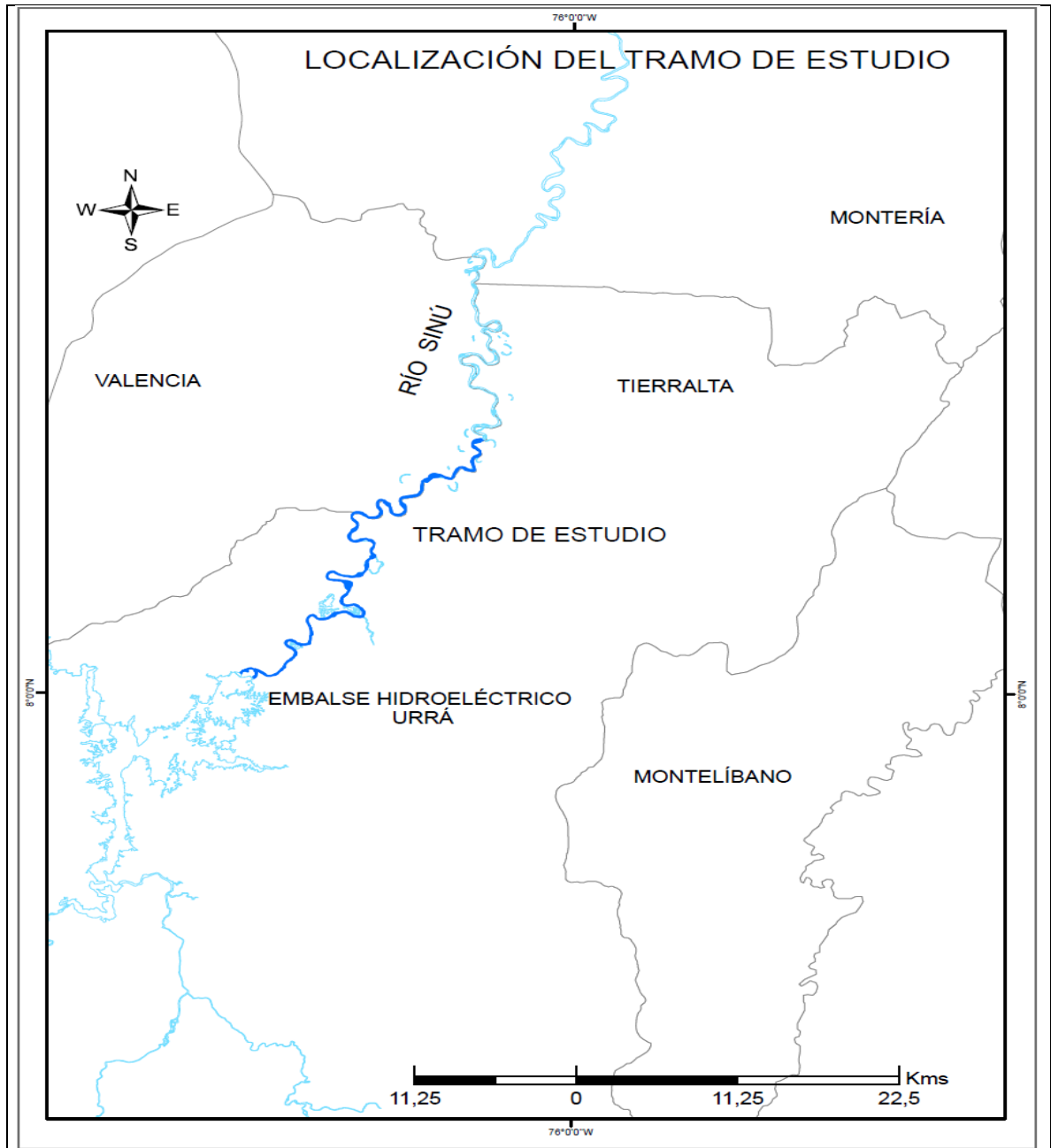


Figura 14. Cuenca alta del río Sinú (Tramo de estudio).

3.2. Características climáticas de la zona de estudio.

A continuación se presentan un resumen de las características climáticas generales de la cuenca del río Sinú, CVS (2004).

- **Precipitación.** El régimen de precipitaciones es unimodal, con periodos de precipitaciones de mayo a noviembre y épocas de sequía entre noviembre y abril. Las mayores precipitaciones se presentan en el alto Sinú, con lluvias medias anuales que varían entre 3000 y 4000 mm. En la parte baja del Parque Nacional Natural Paramillo, donde se ubica la Hidroeléctrica Urrá, las precipitaciones promedios anuales son del orden de los 2000 a 2500 mm, descendiendo entre los 1.400 y 1.700 mm en el municipio de Tierralta y la ciénaga de Betancí; de ahí en adelante las precipitaciones tienen una magnitud aproximada de 1600 a 1400 mm hasta la ciudad de Montería, descendiendo hasta los 1300 mm en el tramo final del río Sinú.
- **Temperatura.** El carácter tropical del valle y la predominancia de las zonas bajas establece un régimen térmico cálido tropical con temperaturas medias mensuales de 27°C desde la zona costera de la cuenca hasta el embalse de Urrá. Solo a partir de este punto la temperatura comienza a descender llegando en las cimas de Paramillo hasta los 8°C.
- **Humedad Relativa.** La variación temporal de la humedad relativa, durante el periodo seco es del 82%, durante el período húmedo se incrementa alrededor del 85%, como resultado la evapotranspiración es mayor durante la estación seca. La humedad relativa presenta su valor mínimo hacia Montería en donde alcanza el 82%, desde este punto hacia el Norte la humedad relativa aumenta muy uniformemente hasta llegar a un valor de 86% en el mar Caribe. De igual forma hacia el Sur también se presenta un incremento en la humedad pero esta llega a un valor máximo 85%, en inmediaciones de la ciénaga de Betancí.

3.3. Clasificación de registros por condición hidrológica.

La clasificación climatológica, se realiza con base en los registros históricos de los indicadores climatológicos (ONI, SOI, MEI) y se evalúa cada año hidrológico como el tiempo comprendido, entre junio de determinado año (Año 0) hasta el mes de mayo próximo (Año 1). La clasificación anual para los fenómenos ENSO (El Niño, La Niña y Normal), se estima ponderando las estimaciones de diferentes índices océano-atmosféricos, como lo son: a) ONI, b) MEI y c) SOI.

- ONI (Oceanic Niño Index): definido como la media móvil de tres meses de las anomalías en la temperatura superficial del mar en la región.
- MEI (Multivariate Enso Index): basado en seis variables observadas sobre el Pacífico tropical: presión (P), componentes de la superficie del viento zonal (U) y meridional (V), temperatura superficial del mar (S), temperatura superficial del aire (A) y fracción de nubosidad total del cielo (C).
- SOI (Southern Oscillation Index): medida de las fluctuaciones en la presión del aire que se producen entre las regiones occidental y oriental del Pacífico tropical, durante episodios de El Niño y La Niña.

En la Tabla 2, se indican los resultados para los indicadores climatológicos, los cuales son sometidos a un consenso para llegar a una clasificación de las fases del fenómeno ENSO.

Tabla 2. Registros históricos de indicadores climatológicos.

Invierno	ONI	SOI	MEI	Consenso
1950-51	C	C	c	La Niña
1951-52	W+	W-		
1955-56	c+	c+	c	Fuerte La Niña
1956-57	C	C-	C-	Suave La Niña
1957-58	W		w	El Niño
1958-59			W-	
1963-64	W	W-		
1964-65	C	C	C-	La Niña
1965-66	W+	W	w	El Niño
1966-67			C-	
1967-68			C-	
1968-69		W	W-	
1969-70	W	W		
1970-71	C	C	c	La Niña
1971-72	C	C-	C-	Suave La Niña
1972-73	W+		W+	Fuerte El Niño
1973-74	C	C+	C+	Fuerte La Niña
1974-75	C	C-	C-	Suave La Niña
1975-76	C+	C+	c	Fuerte La Niña
1973-77	W	W-		
1977-78	w+	W-	W-	El Niño
1973-79				
1983-84		C-		
1984-85		C-	C-	Suave La Niña
1985-86				
1983-87		W	W+	
1987-88		W	W+	El Niño
1983-89	c	C	c	Fuerte La Niña
1909-90				
1999-91		w+		
1991-92	w	w+	w+	Fuerte El Niño
1992-93	w	w+	W	El Niño
1993-94	w+	W		
1994-95	w-	W	w-	El Niño
1995-96		C-	C-	
1993-97				
1997-98	w+	w+	w+	Fuerte El Niño
1993-99	c	C	C-	La Niña
1999-00		C	c	
2009-01	c	C-	C-	La Niña
2001-02				
2002-03	w	W	w	El Niño

Fuente: NOAA

Los años hidrológicos 1965-66, 1972-73, 1982-83, 1991-92 y 1997-1998, están clasificados por el fenómeno de El Niño, puesto que los indicadores climatológicos reportan gran influencia de este fenómeno. En la Tabla 3, se indican los resultados de los consensos entre los indicadores climatológicos y su clasificación por año.

Tabla 3. Clasificación de las fases del fenómeno ENSO (1950 – 2011)

EL NIÑO			LA NIÑA			NORMAL o NO ENSO	
Débil	Moderado	Fuerte	Débil	Moderado	Fuerte		
1963-64	1951-52	1965-66	1954-55	1950-51	1955-56	1952-53	1953-54
1968-69	1957-58	1972-73	1956-57	1970-71	1973-74	1958-59	1959-60
1969-70	1977-78	1982-83	1962-63	1998-99	1975-76	1960-61	1961-62
1976-77	1987-88	1991-92	1964-65	2000-01	1988-89	1966-67	1978-79
1986-87	1994-95	1997-98	1967-68	2007-08	2010-11	1979-80	1980-81
1992-93	2002-03	1971-72				1981-82	1983-84
2004-05	2009-10	1974-75				1985-86	1989-90
2006-07	1984-85					1990-91	1993-94
1995-96						1996-97	2001-02
1999-00						2003-04	2005-06
2008-09							

Fuente: NOAA

4. METODOLOGÍA APLICADA

La dinámica morfológica es un proceso complejo que experimenta un río, por cuanto intervienen un conjunto de variables en interacción continua, la presencia de bucles de causalidad y retroalimentación no lineales en las variables hidrológicas, hidráulicas, morfológicas y ambientales, implica que los modelos matemáticos planteados en la actualidad para simular el comportamiento hidrodinámico y morfológico de un río difieran en los resultados unos de otros, por tanto no existe un modelo único de uso generalizado.

A continuación en la Figura 15, se describe la metodología empleada en el desarrollo de los modelos estadísticos para la estimación de indicadores morfológicos, asociados a los cambios en el régimen hidrológico del río Sinú.

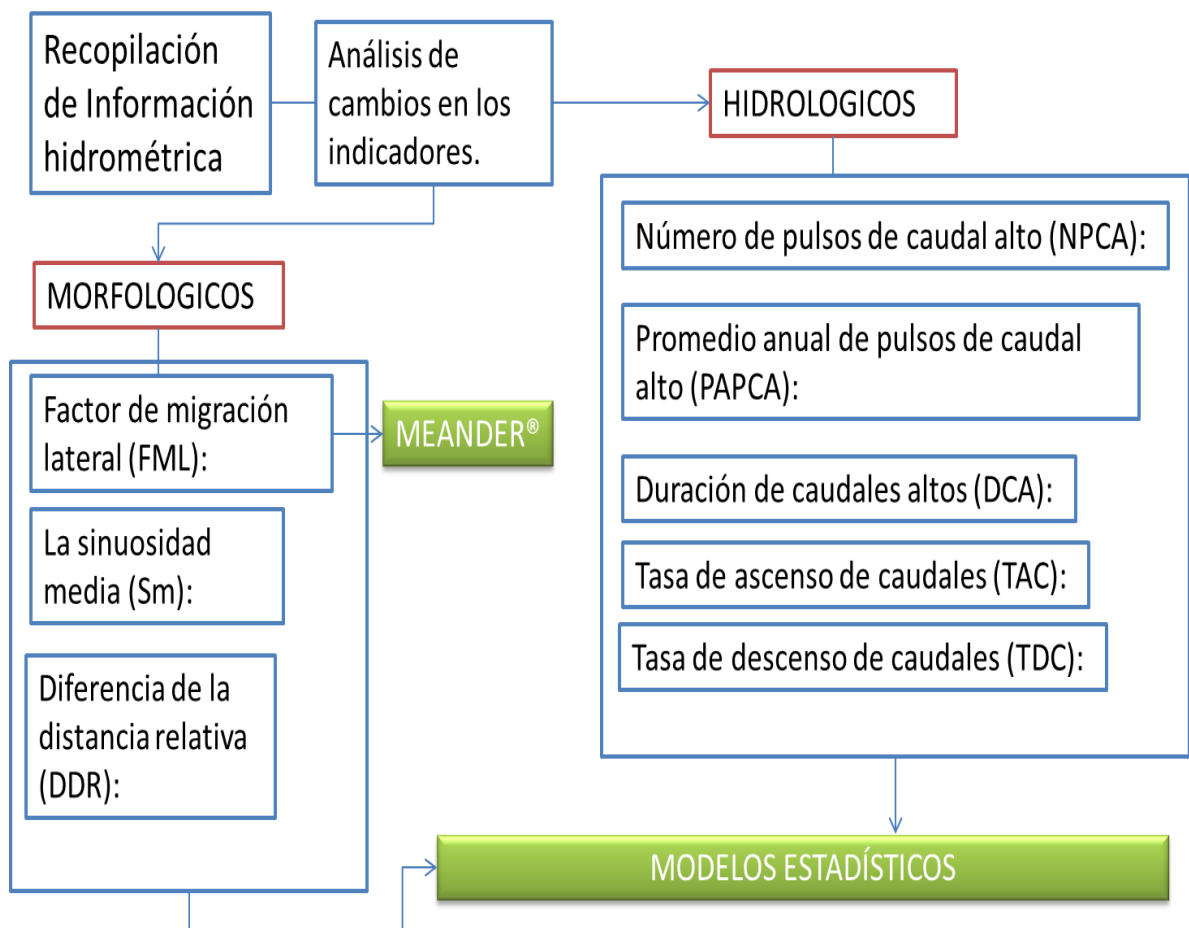


Figura 15. Esquema metodológico a desarrollar en la investigación.

4.1. Recopilación y análisis de Información hidrométrica.

Inicialmente, se realizó un análisis de la información hidrométrica suministrada por el consorcio que opera el embalse URRRA S.A., la información se basa especialmente en los datos de descarga registrados por el embalse y los aforos que se realizan continuamente en las estaciones hidrométricas, ubicadas aguas abajo del embalse, (Ver Anexo 1).

4.2. Análisis de indicadores de cambios hidrológicos en las corrientes.

Los indicadores de cambio hidrológico en las corrientes, se analizaron en periodos de tiempo hidrológicos, definidos a partir de los registros morfológicos disponibles de la zona en estudio.

Los indicadores hidrológicos seleccionados fueron: Número de pulsos de caudal alto, promedio anual del número de pulsos de caudal altos, duración de pulsos de caudal alto y las tasas de variación de caudal (ascenso y descenso), los cuales se describen a continuación:

- Número de pulsos de caudal alto (NPCA): La estimación de este parámetro se realizó con base en los cuartiles del 75%, para cada registro en particular. Aquellos pulsos que superan el umbral del 75%, se denominan pulsos de caudal alto. Para un periodo hidrológico determinado el número de pulsos de caudal alto, se calcula como la sumatoria de los pulsos de caudal anuales.
- Promedio anual de pulsos de caudal alto (PAPCA): la estimación de este parámetro para un periodo determinado, se realiza con base en la sumatoria de los pulsos de caudal anuales, este valor se divide entre el número de años del periodo hidrológico analizado.
- Duración de caudales altos (DCA): se realiza la estimación de este parámetro con base en los cuartiles del 75%, para cada registro en particular. La duración de los caudales altos se realiza con base en el registro de aquellos caudales que superan el umbral del 75% de forma constante.

- Tasa de ascenso de caudales (TAC): este parámetro se estima con base en la diferencia positiva entre valores de caudales diarios consecutivos.
- Tasa de descenso de caudales (TDC): este parámetro se estima con base en la diferencia negativa entre valores de caudales diarios consecutivos.

4.3. Análisis de indicadores de cambios morfológicos en las corrientes.

Los indicadores morfológicos analizados comprenden la sinuosidad, el factor de migración lateral y la diferencia de la distancia relativa, los cuales se describen a continuación:

- Factor de migración lateral (FML): Se calcula con base en el promedio anual de la relación entre el radio de curvatura y ancho de canal, dependiendo del rango de valores obtenidos, se eleva a un exponencial determinado.
- La sinuosidad media (S_m): La sinuosidad media se define como el promedio de la sinuosidad anual, la cual es calculada como la relación de la longitud del cauce entre la longitud de su valle.
- Diferencia de la distancia relativa: el indicador se determina como la diferencia entre los valores anuales de la distancia relativa (DR), el cual se estima teniendo en cuenta los thalweg caracterizados en el periodo hidrológico de estudio y determinando las distancias de las mimas, con respecto a una línea de referencia previamente predefinida.

Los indicadores de cambios morfológicos sobre el río Sinú, se enfocan en caracterizar la forma en planta del río, definir la sinuosidad, la migración lateral y analizar la configuración de uno o múltiples cauces principales. Con el fin de integrar estos indicadores, fue necesario implementar un software especializado en caracterizar la morfología de los ríos, estos indicadores se determinaron y analizaron mediante formulaciones empíricas y con ayuda del software especializado MEANDER.

4.4. Software MEANDER.

El programa MEANDER es un software informático desarrollado en el 2005, por el Departamento de Ingeniería Civil de la Texas A&M University cuyo objeto fue predecir la migración lateral en ríos. El programa escrito originalmente en lenguaje C++; además, posee una interfaz gráfica de usuario (UGI) desarrollada en Matlab, que facilita la entrada de datos y una fácil visualización de los resultados, (Ver Anexo 2).

Al igual que en la erosión de las márgenes, las relaciones del radio de curvatura y ancho de canal, son utilizadas para cuantificar el potencial erosivo del río en el fondo del cauce, estas formulaciones empíricas relacionan la profundidad de la recta en la entrada de la curva con la máxima profundidad en la curvatura a partir de datos de la geometría.

4.4.1. Sinuosidad.

La sinuosidad, S , de un río representa su grado de tortuosidad y se define como la relación entre la longitud del cauce y la longitud de su valle, o también como la relación inversa entre sus respectivas pendientes. En la Figura 16, se observa la longitud calculada sobre el trazado del río (Longitud del río) y la distancia en línea recta entre dos puntos extremos (Longitud del valle). Finalmente, se distingue el valor obtenido entre las tres categorías de sinuosidades: (i) Sinuosidad baja, valores entre 1,0 y 1,3; (ii) Sinuosidad moderada, con valores entre 1,3 y 2,0; y, (iii) Sinuosidad alta, si es mayor a 2,0. Culbertson et al (1967)

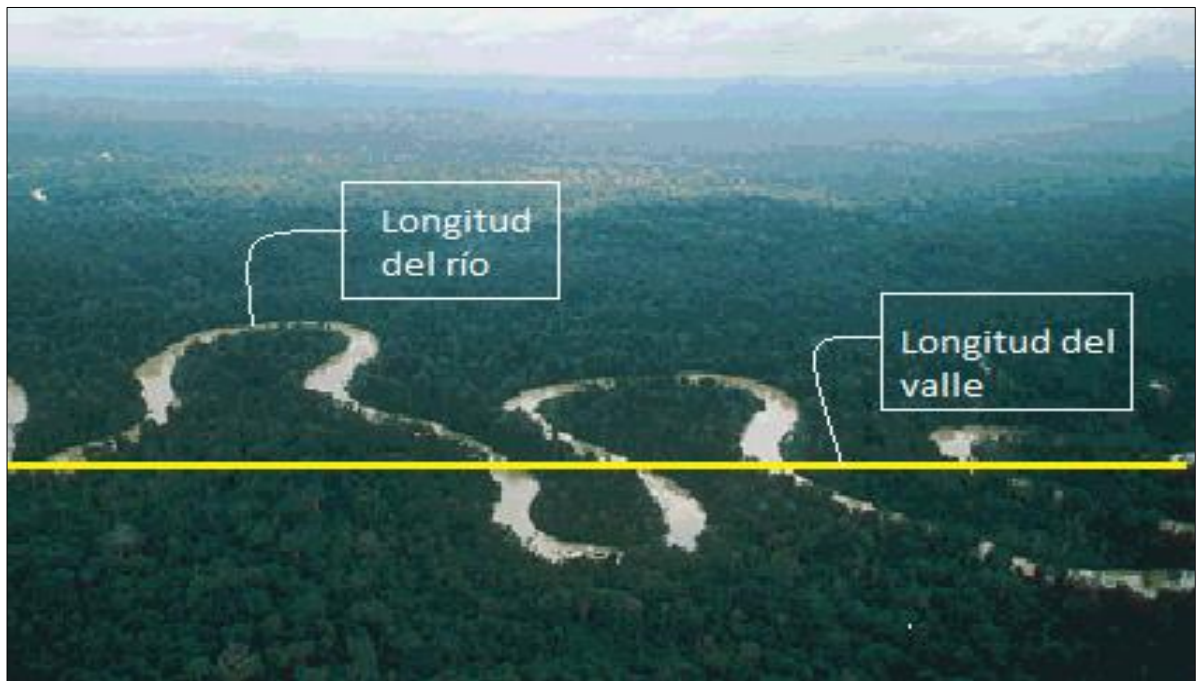


Figura 16. Estimación de la valle Sinuosidad de un cauce.

4.4.2. Distancia relativa entre dos cauces

La distancia relativa es un indicador desarrollado en la presente investigación y cuyo objeto es determinar qué tan lejos están dos objetos (meandros) entre ellos, para lo cual se estima una línea de referencia común para todas las formas en planta disponibles.

En el caso particular del río Sinú, la línea de referencia es un meridiano imaginario trazado a partir de los siguientes coordenadas: punto inicial X: 1400000, Y: 765000, hasta el punto final X: 1375000, Y: 765000. A partir de la línea de referencia, se realizó el trazo de varias líneas paralelas equidistantes, determinando la longitud de cada paralelo, tal como se observa en Figura 17.

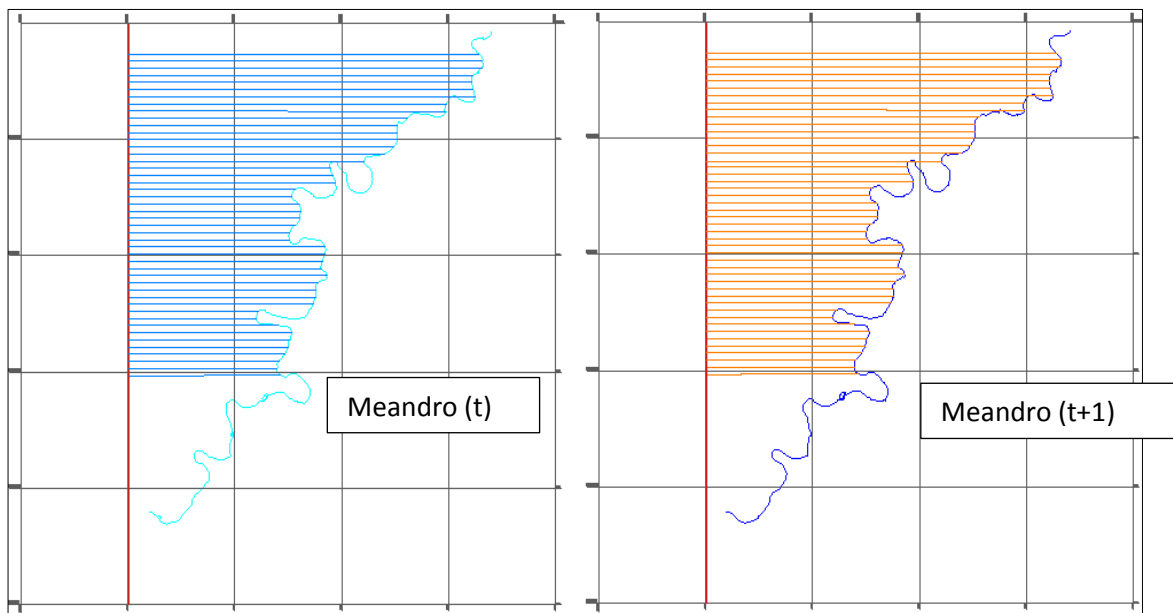


Figura 17. Distancia relativa para un meandro en un tiempo (t) y (t+1)

4.4.3. Diferencia en la distancia relativa entre dos cauces

La diferencia entre la longitud de cada paralelo constituye una medida cuantitativa de los cambios morfológicos que presenta un cauce en un lapso de tiempo. El promedio en las diferencia de longitudes registradas, se estableció como una medida del indicador diferencia en la distancia relativa entre dos cauces (DDR).

4.5. Modelos estadísticos para el análisis hidro-morfológico del cauce.

Los modelos estadísticos no lineales se determinaron para cada una de las variables dependientes (factor de migración lateral, sinuosidad y distancia relativa), analizando la relación entre las variables hidrológicas y los indicadores de cambios morfológicos en el río Sinú.

En la selección del mejor modelo, se evaluaron estadísticos diagnósticos como bondad de ajuste (r^2), se analizaron los residuos, se aplicó el diagrama de Theil y finalmente se realizó la validación del modelo.

4.5.1. Selección del modelo.

Se preseleccionaron modelos con base en los mejores ajustes a la curva, para lo cual se aplicaron las herramientas Curve fitting toolbox de MATLAB y Snapstats del software estadístico STATGRAPHICS.

Para cada variable dependiente (Factor de migración lateral, sinuosidad y distancia relativa), se preseleccionaron aproximadamente tres modelos estadísticos (Exponencial, potencial y empírico). El proceso de selección comprende la estimación de los parámetros aplicando el método de simulación de Monte Carlo, realizando un análisis de varianza, análisis de residuos y estimación de las tasas de variación. Finalmente, son seleccionados los modelos que mejor ajuste obtuvieron a los datos recolectados y verificando los estadísticos SSE, RMSE, bondad de ajuste (r^2).

4.5.1.2. Estimación de parámetros aplicando Monte Carlo.

El método de Monte Carlo es un procedimiento de cálculo matemático aplicado para estimar la distribución de parámetros desconocidos en los modelos estadísticos preseleccionados y conocer la distribución de los parámetros existentes.

Inicialmente, se estableció un conjunto de parámetros conocidos (datos teóricos) y se estimaron otros parámetros (datos calculados), a partir de funciones o modelos propuestos. De igual forma, se determinaron valores semillas para cada variable desconocida del modelo y se realizaron estimaciones aleatorias para cada variable dentro de un intervalo preestablecido. Al repetir n número de veces la simulación de Monte Carlo, son generados una gama exacta de posibilidades, con su respectiva probabilidad. Finalmente, se obtiene un conjunto de datos que evalúan sistemáticamente el modelo propuesto, y del cual se selecciona los valores con mejor estadístico (r^2).

4.5.1.3. Análisis de varianza.

Para determinar la significancia estadística de las variables dependientes, se realizó un análisis de varianza para cada modelo preestablecido, determinando la suma de cuadrados del modelo, la suma de cuadrados residual o del error y evaluando los estadísticos p-valor, la prueba t-student y el estadístico F.

4.5.1.4. Análisis de residuos.

Se analizó el comportamiento homocedástico o heterocedástico de los residuos y la tendencia en la dispersión de los datos, determinando posibles valores atípicos en los residuos o la existencia de puntos influyentes en la dispersión.

4.5.1.5. Tasas de variación.

Las tasas de variación establecidas para el factor de migración lateral, permiten inferir a través del diagrama de Theil si los datos obtenidos se encuentran sobre estimados o subestimados. Si el modelo ajusta bien, los puntos deberían estar dispersos aleatoriamente alrededor de la línea diagonal. A veces, es posible apreciar curvatura en este gráfico, lo que indicaría la necesidad de un modelo curvilíneo más que uno lineal.

4.5.1.6. Diagrama de Theil.

Corresponden a un diagrama de dispersión donde se representó las tasas de crecimiento reales y estimadas para la variable endógena. La línea de predicción perfecta corresponde a la diagonal que atraviesa los cuadrantes primero y tercero, con zonas de sub o sobrevaloración.

El coeficiente de desigualdad de Theil (U de Theil), corresponde a la cuantificación del diagrama de predicción - realización. El valor 0 supone una predicción perfecta ya que coinciden ambas tasas en todos los puntos y el valor 1 supone máxima desigualdad, este hecho se puede deber a predicciones nulas para valores reales distintos de cero o viceversa.

$$U = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_t - \hat{y}_t)^2}{n}}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n y_t^2}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n \hat{y}_t^2}{n}}} \quad (12)$$

4.5.2. Validación del modelo.

El proceso de validación de modelos estadísticos permite cuantificar que tan adecuadamente el modelo describe los datos (observaciones o simulaciones) para los cuales fue aplicado.

En la selección de modelos estadísticos se inicia la etapa de validación, al evaluar algunos estadísticos de prueba como el coeficiente de correlación, los resultados de una prueba F, el análisis de varianza y el análisis de residuos.

Los modelos estadísticos seleccionados, fueron validados mediante la caracterización de la serie hidrológica para el río Sinú entre los años (2006-2014), donde se obtuvieron datos de las variables independientes, tales como el número de pulsos altos de caudal, duración de caudal alto, tasas de ascenso y tasas de descenso de caudal. Posteriormente, se realizó la caracterización de la forma en planta del río Sinú para el año 2014, para obtener datos teóricos de la morfología de cauce.

Los datos provenientes de las variables independientes, se ingresaron a los modelos estadísticos correspondientes y se verificaron los resultados de los modelos estadísticos difieren por poco de los datos teóricos, y se localizan dentro de los intervalos de predicción de los modelos.

5. PROCESAMIENTO DE INFORMACION

En este capítulo, se desarrollan los análisis hidrológicos en la zona de estudio, las caracterizaciones morfológicas del cauce.

5.1. Análisis de indicadores de cambio hidrológicos en las corrientes.

Los indicadores de cambio en el régimen hidrológico para el río Sinú, son evaluados a través de un análisis estadístico de las series de tiempo, para los periodos hidrológicos de (1962-1981), (1982-1988), (1989-1994) y (1999-2005), (Ver Anexo 3).

5.1.1. Análisis general de cambio hidrológico para el río Sinú (1960-2011).

Desde el año 1999, el régimen hidrológico del río Sinú se encuentra influenciado por la operación del embalse multipropósito Urra. En la Figura 18, se observa que en el periodo de invierno se registran caudales mayores a los 1000 m³/s y para periodos de verano caudales cercanos a los 200 m³/s, con una media de 400 m³/s en los registros diarios de caudal, (Ver anexo 4).

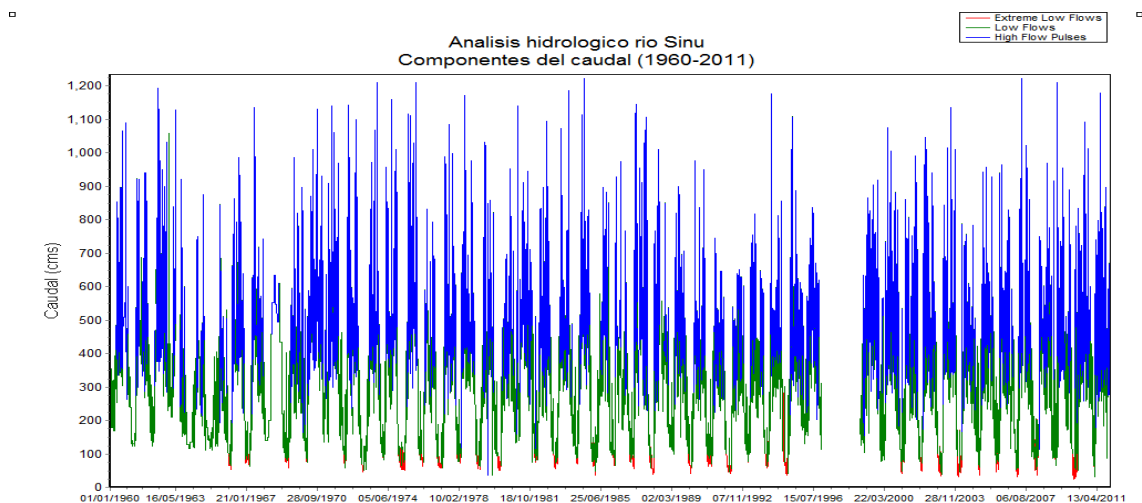


Figura 18. Análisis hidrológico para el río Sinú (1960-2011)

Las variaciones en los pulsos de caudal alto son menores en la etapa post-embalse, los pulsos altos en la etapa pre-embalse presentan mayor variabilidad,

tal como se indica en la Figura 19. Sin embargo, por efecto de la operación del embalse el número de pulsos paso en promedio 20 a 24 pulsos por año.

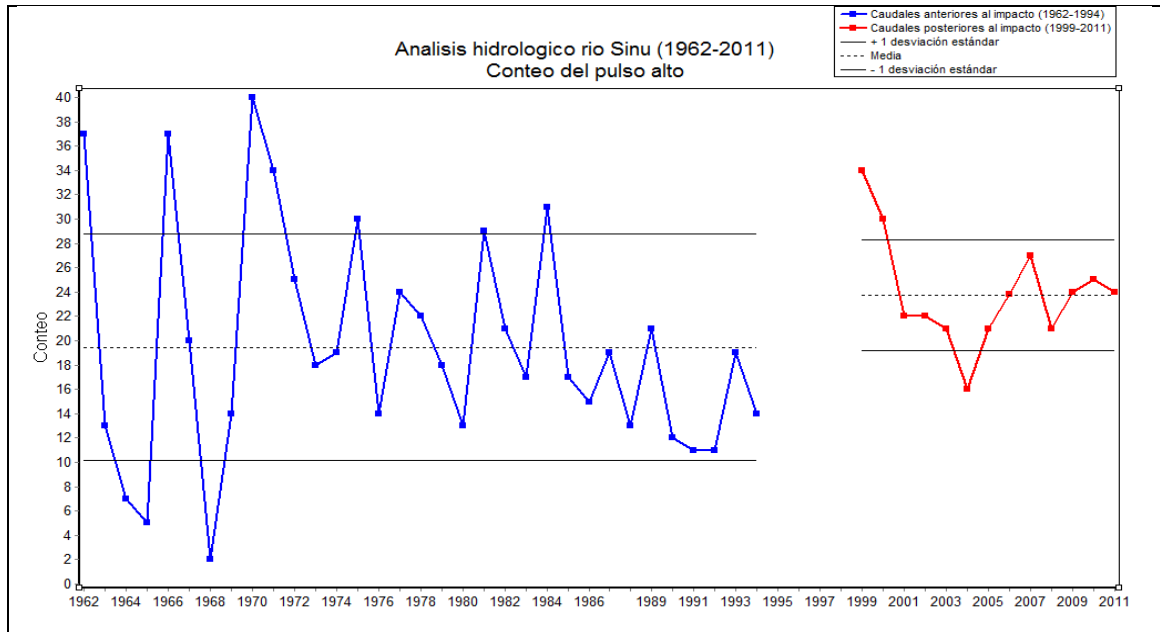


Figura 19. Pulsos altos de caudal para el río Sinú (1960- 2011).

El comportamiento del indicador duración de caudal alto, es mayor antes de la entrada en operación de la presa, en el periodo comprendido entre los años 1962 y 1981 la duración del caudal alto fue de 3 días, desde 1981 hasta 1989 aumento a 3.41 días, la duración del caudal alto fue de 2.22 días en el periodo de 1989 a 1994. Tal como se observa en la Figura 20, en la etapa de post-embalse se observa que disminuye la tendencia en la duración de los pulsos altos de caudal, desde 1999 hasta 2002 la duración de caudales altos es de 2.135 días, para los años entre 2002 y 2004 fue de 2.45 días. Mientras que, para el periodo de 2004 a 2005, la duración en los pulsos de caudales altos fue de 2 días.

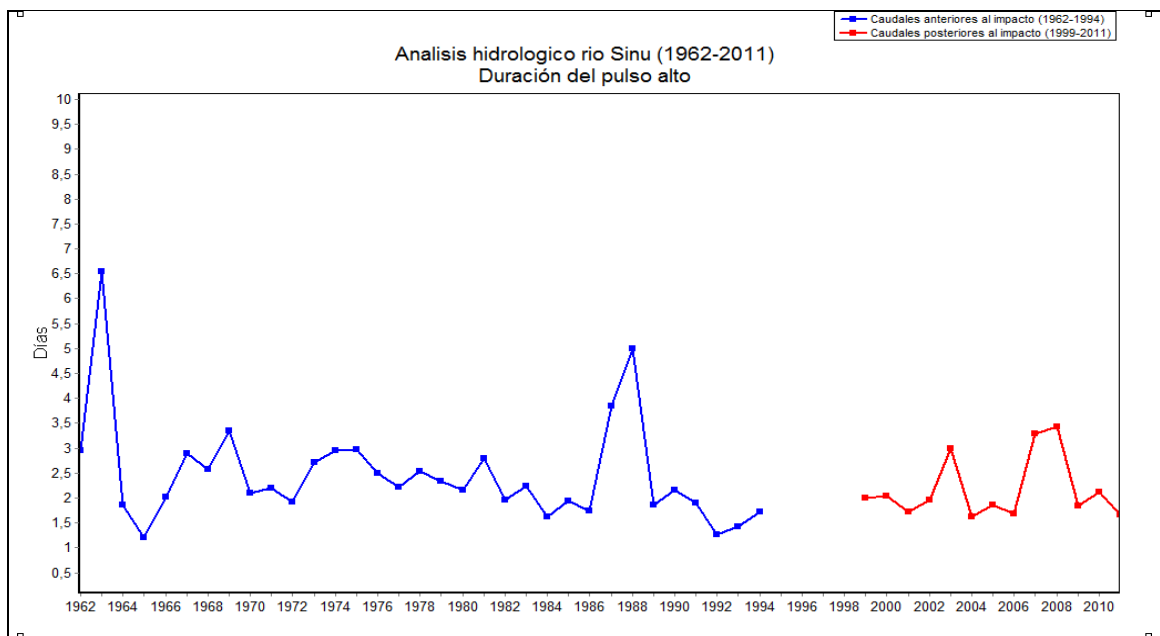


Figura 20. Duración de pulsos altos de caudal para el río Sinú (1960- 2011)

La Figura 21, se observa las grandes inundaciones presentes en el registro hidrológico, en la etapa pre-embalse se registran cuatro grandes inundaciones con un promedio de $1650 \text{ m}^3/\text{s}$. Sin embargo, en la etapa post-embalse el promedio de las grandes inundaciones aumento a $2000 \text{ m}^3/\text{s}$. En general, la temporada invernal del 2010-2011 se considera una temporada atípica, al registrar grandes inundaciones con picos de caudal de $2500 \text{ m}^3/\text{s}$.

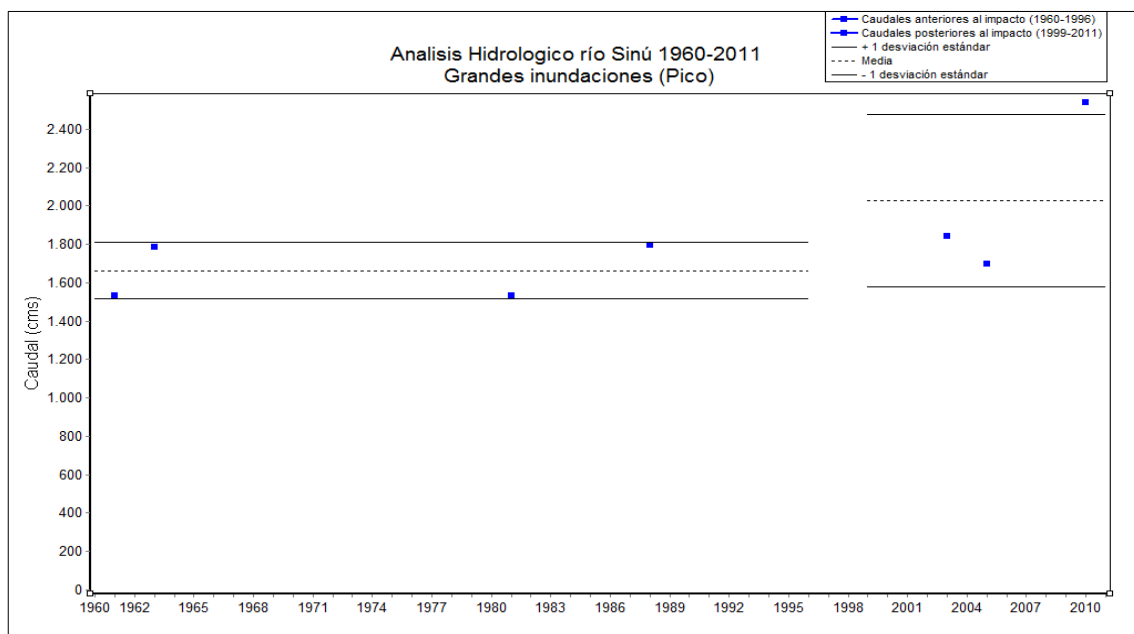


Figura 21. Grandes inundaciones sobre el río Sinú (1960- 2011).

En la Figura 22, se observa que desde el año de 1999 las tasas de ascenso disminuyeron la variabilidad de sus datos en comparación con la etapa pre-Embalse. Sin embargo, mantiene un promedio general en las dos etapas de 90 m³/s.

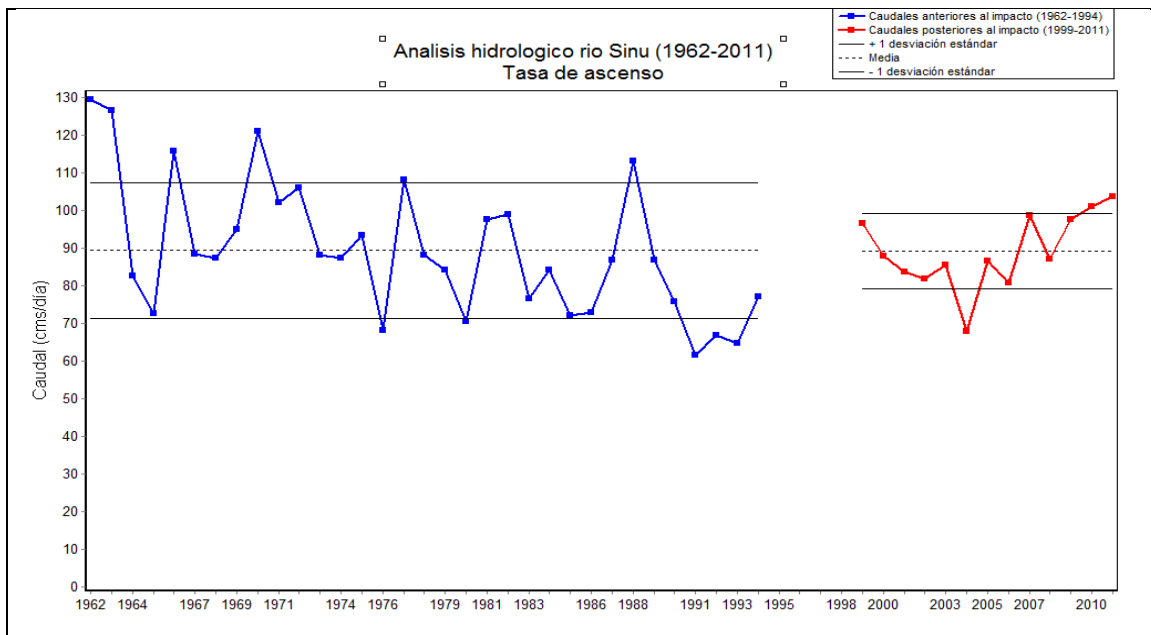


Figura 22. Tasas de ascenso de caudal (1960- 2011)

Desde el año de 1999, se observa que las tasas de descenso de caudal aumentaron la variabilidad de sus datos en comparación con la etapa de post-embalse. La tasa de descenso en caudales para el periodo entre 1962 y 1981 es de 66.5 metros cúbicos/segundos al día, desde 1982 hasta 1988 disminuyó a 53.14 metros cúbicos/segundos al día, para el periodo de 1989 a 1994, la tasa de descenso de caudales fue de 46.33 metros cúbicos/segundos al día. tal como se observa en la Figura 23, en la etapa post embalse se observa para el periodo entre 1999 y 2002, un aumento hasta los 67.12 metros cúbicos/segundos al día, desde el año 2002 hasta 2004 disminuye a 61 metros cúbicos/segundos al día, nuevamente descendiendo la tasa de descenso a 60 metros cúbicos/segundos al día en el periodo 2004 a 2005.

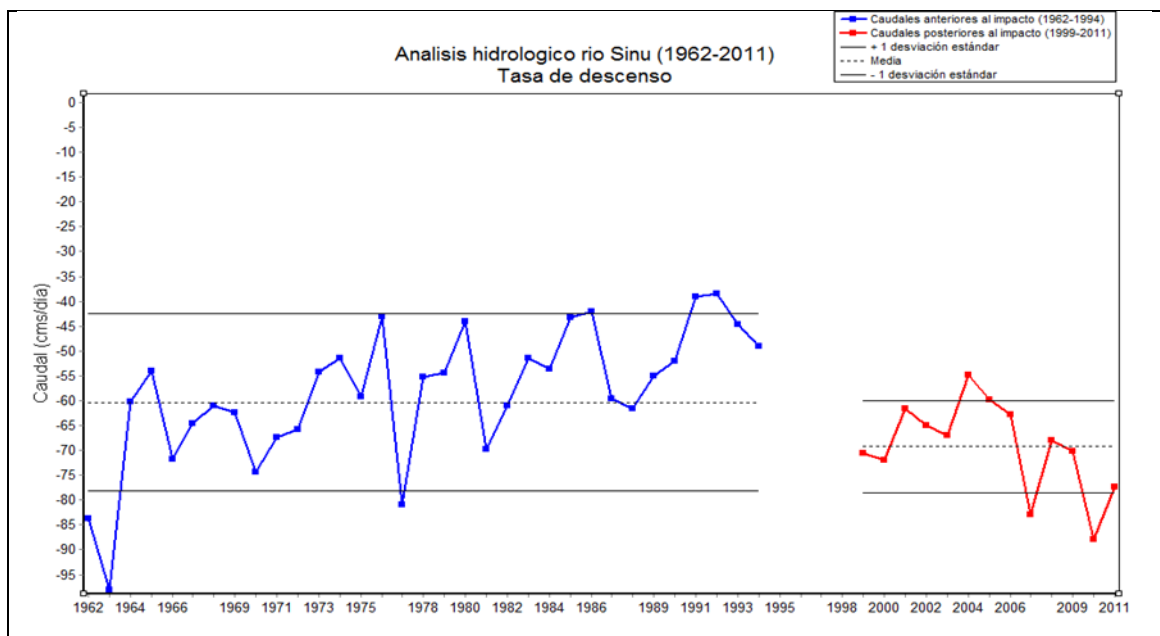


Figura 23. Tasas de descenso de caudal (1960- 2011).

5.2. Análisis de indicadores de cambio morfológicos en las corrientes.

El análisis multitemporal de imágenes y cartografía sobre el río Sinú, permite identificar los cambios morfológicos en el cauce. En el largo plazo, los ríos aparentemente estacionarios muestran su evolución planimétrica, la evidencia de la evolución morfológica del meandro es proporcionada por diagramas secuenciales en el tiempo, a partir de los registros fotométricos de las orillas del río, en los cuales se indica la posición del meandro antiguo. La evolución morfológica del río Sinú en la etapa pre-embalse y después de la entrada en operación de la presa, son registradas en la Figura 24 y Figura 25, respectivamente.

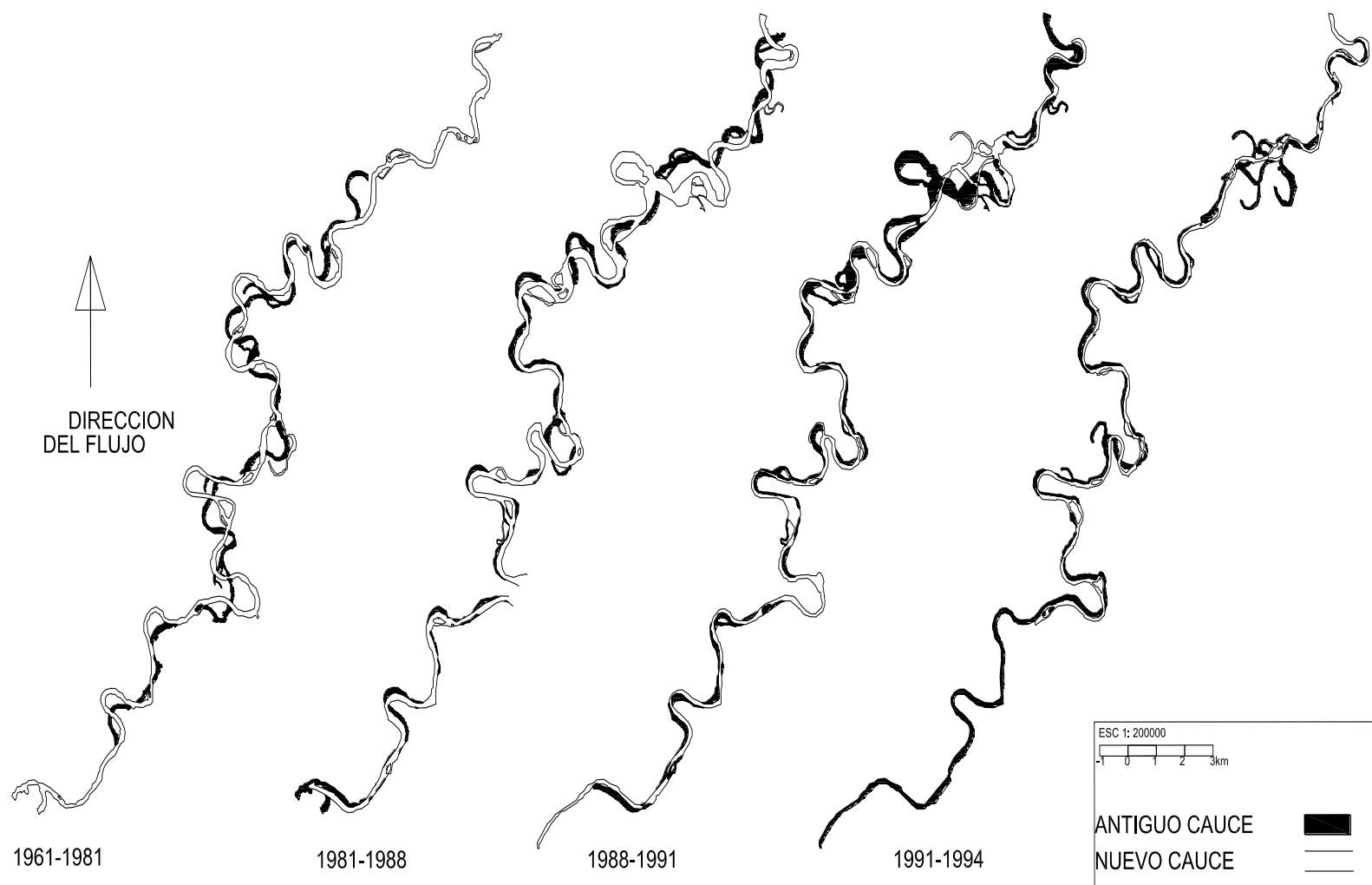


Figura 24. Evolución morfológica del río Sinú, en la etapa pre-embalse desde 1961 hasta 1994.

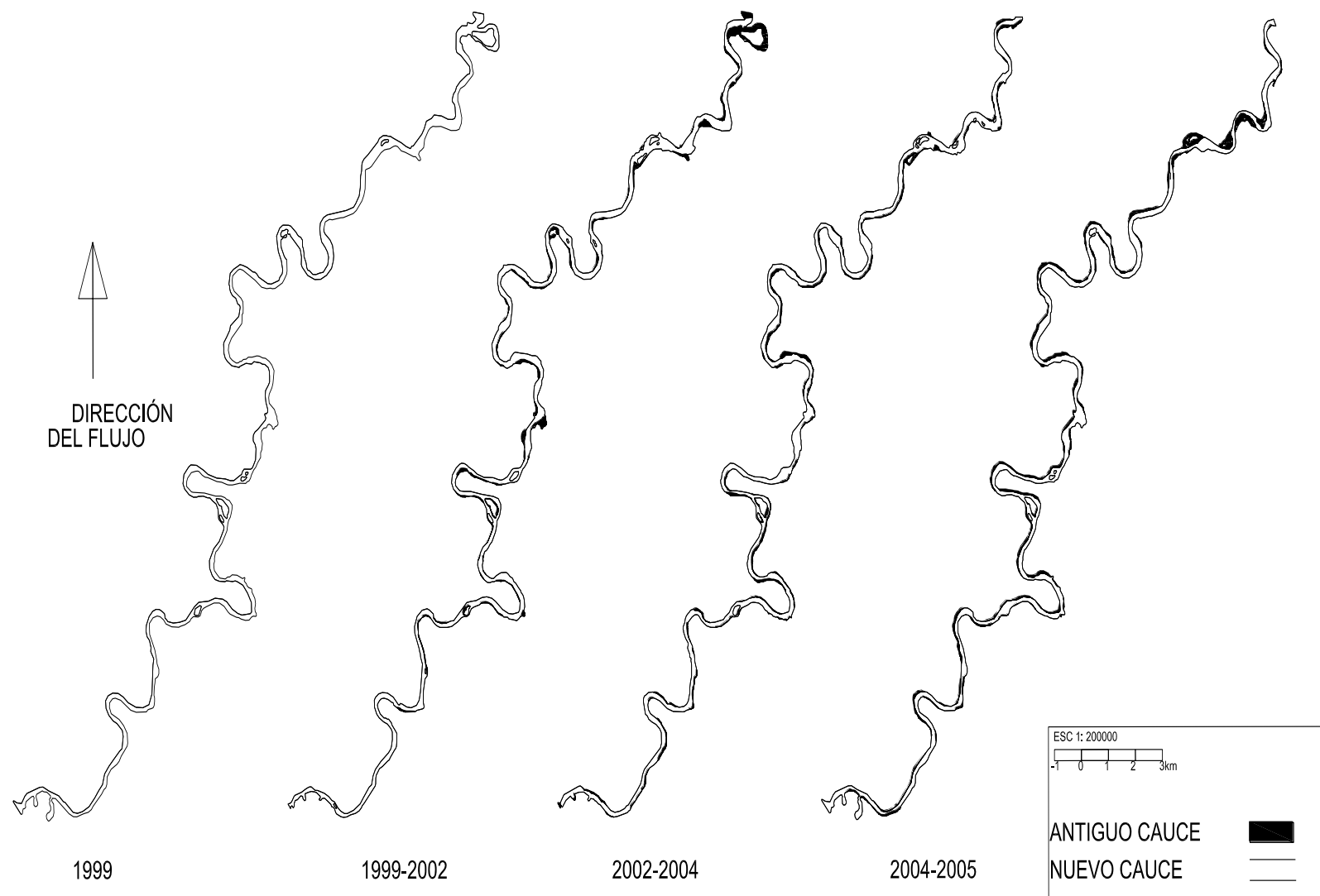


Figura 25. Evolución morfológica del río Sinú, en la etapa post-embalse desde 1999 hasta 2005.

5.3. Cálculo de variables geomorfológicas.

Las variables geomorfológicas son deducidas con base en los registros de imágenes sobre el río Sinú, para caracterizar la forma en planta del meandro y su potencial erosivo, (Ver Anexo 5).

5.3.1. Índice de Sinuosidad.

Para describir y cuantificar la sinuosidad presente en el río Sinú se establece la relación entre la longitud del thalweg y la longitud del valle, es decir, la relación entre la distancia que separa dos puntos a lo largo de la parte más profunda del cauce y la distancia en línea recta entre ellos, lo cual representa cuanto el trazado del río se aparta de una línea recta. En la Tabla 5, se observan los indicadores históricos de Sinuosidad para el río Sinú.

Tabla 4.Registro histórico de Sinuosidad para el río Sinú.

Año	Longitud del Thalweg (m)	Longitud del valle (m)	S
1961	33260	17882	1,86
1981	52494	27059	1,94
1988	55112	26753	2,06
1994	53421	24789	2,16
1999	49022	26444	1,85
2002	49722	26492	1,88
2004	49965	26649	1,87
2005	50046	26671	1,88

El comportamiento histórico de la sinuosidad presente en el río Sinú, indica que entre el año 1961 y 1994, se produce un notable incremento en la sinuosidad del río con valores que oscilan entre 1.86 y 2.16, lo cual refleja el desarrollo de meandros con gran amplitud y alta dinámica morfológica, tal como se observa en la Figura 26. Sin embargo, la sinuosidad decrece considerablemente desde la construcción y operación del embalse hidroeléctrico URRRA S.A. entre los años 1999 y 2005, situándose en valores históricos de 1.85 y 1.88, indicando una tendencia hacia un meandro con morfología más estable.

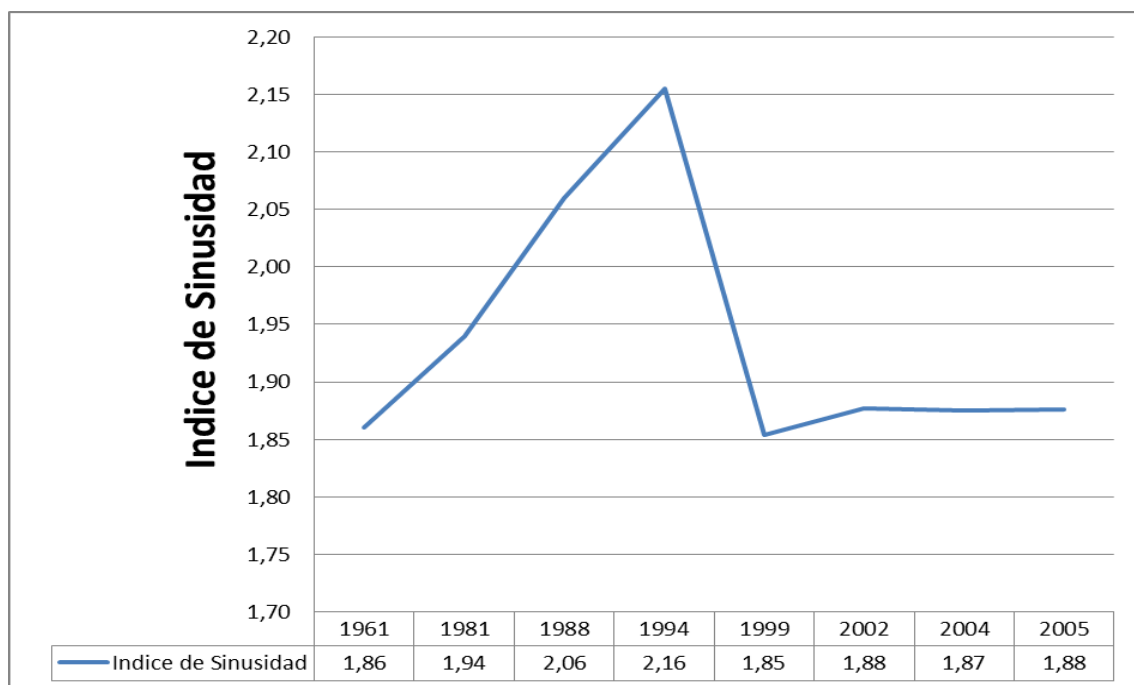


Figura 26. Comportamiento histórico de la Sinuosidad para el río Sinú.

La sinuosidad media (S_m) determina la variabilidad en el índice de sinuosidad para los periodos de registro histórico, tal como se indica en la Tabla 6.

Tabla 5. Sinuosidad media(S_m) para el río Sinú.

Año	S_m
1962-1981	1,90
1981-1988	2,00
1988-1994	2,11
1999-2002	1,865
2002-2004	1,876
2004-2005	1,876

5.3.2. Factor de migración lateral.

El efecto de la migración lateral sobre las curvaturas del río Sinú, se determina con base en la relación radio de curvatura y ancho del río (R_c/W). En la Figura 27, se observa el comportamiento anual del indicador (R_c/W), sus medias, medianas y el rango de valores para cada año.

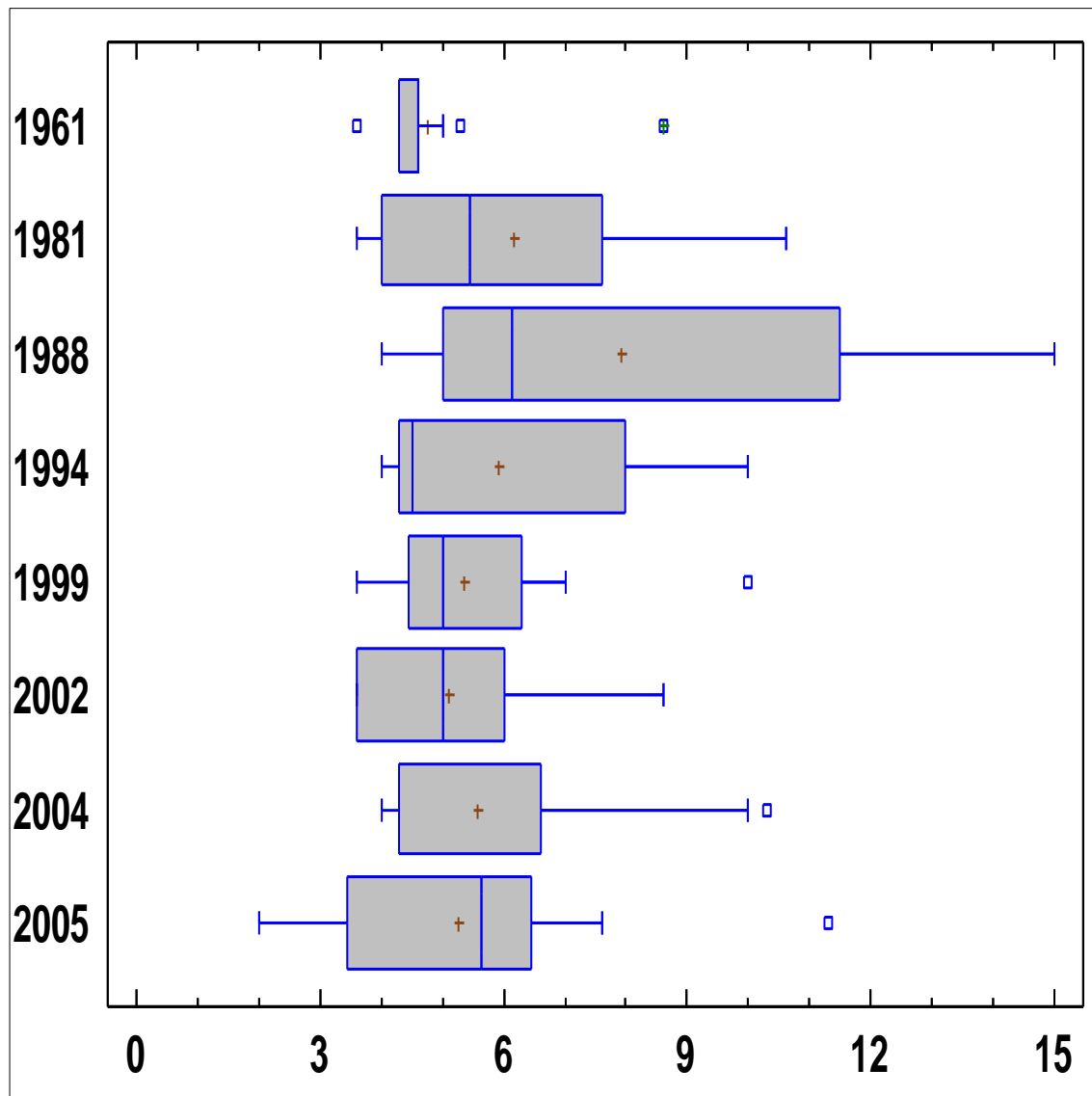


Figura 27. Comportamiento anual del indicador (R_c/W).

El factor de migración lateral es calculado con base en la media anual para la relación radio de curvatura y ancho de canal, tal como se indica en la Tabla 7.

Tabla 6. Registro histórico del factor de migración lateral para el río Sinú.

Año	Rc/W	F. M. L (m/año)
1961	4,89	0,409
1981	5,68	0,352
1988	7,90	0,253
1994	5,90	0,339
1999	5,36	0,373
2002	5,12	0,391
2004	5,56	0,360
2005	5,15	0,388

La migración lateral en el río Sinú para el año 1961 era de 0.40 m/año con una fuerte tendencia decreciente, tal como se observa en la Figura 28. Se registra en el año 1988 su mínimo histórico con un valor de 0.25 m/año, tras lo cual se estabiliza en los años posteriores por encima de 0.35 m/año.

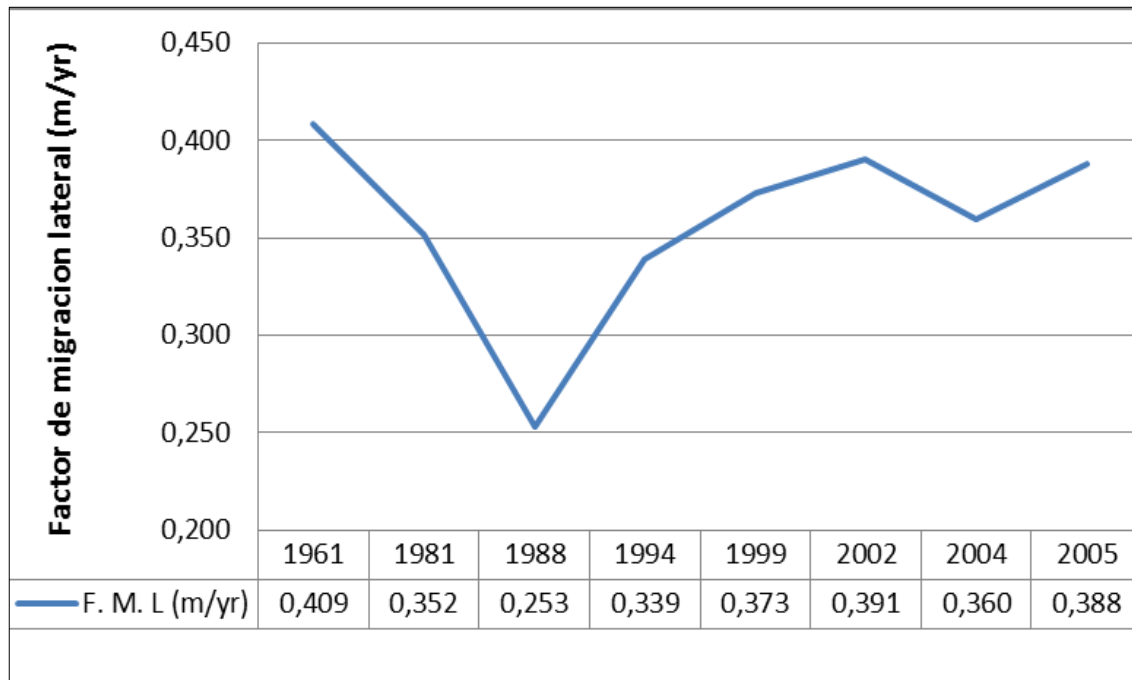


Figura 28. Comportamiento histórico del factor de migración lateral para el río Sinú.

El promedio anual del factor de migración lateral aplicada para los periodos de registro histórico, determina la variabilidad periódica del indicador, tal como observa en la Tabla 8.

Tabla 7. Variabilidad periódica del factor de migración lateral en el río Sinú.

Año	Factor de migración lateral (m/año)
1962-1981	0,378
1981-1988	0,294
1988-1994	0,289
1999-2002	0,382
2002-2004	0,374
2004-2005	0,373

5.3.3. Distancia relativa entre dos cauces.

Los cambios en la morfología del río Sinú se analizan mediante la superposición de los registros históricos en sus formas en planta, permite cuantificar las áreas de avance y retroceso que presenta un cauce e identificar la distancia relativa como indicador de cambio morfológico.

5.3.3.1. Desplazamiento lateral sobre el río Sinú 1961-1981.

La superposición de la forma en planta que tiene el río en 1961 con la forma en planta del río en 1981, denota una migración mayor hacia la margen izquierda del río Sinu, con áreas de retroceso formadas por procesos erosivos, tal como se observa en la Figura 29, (Ver Anexo 6).

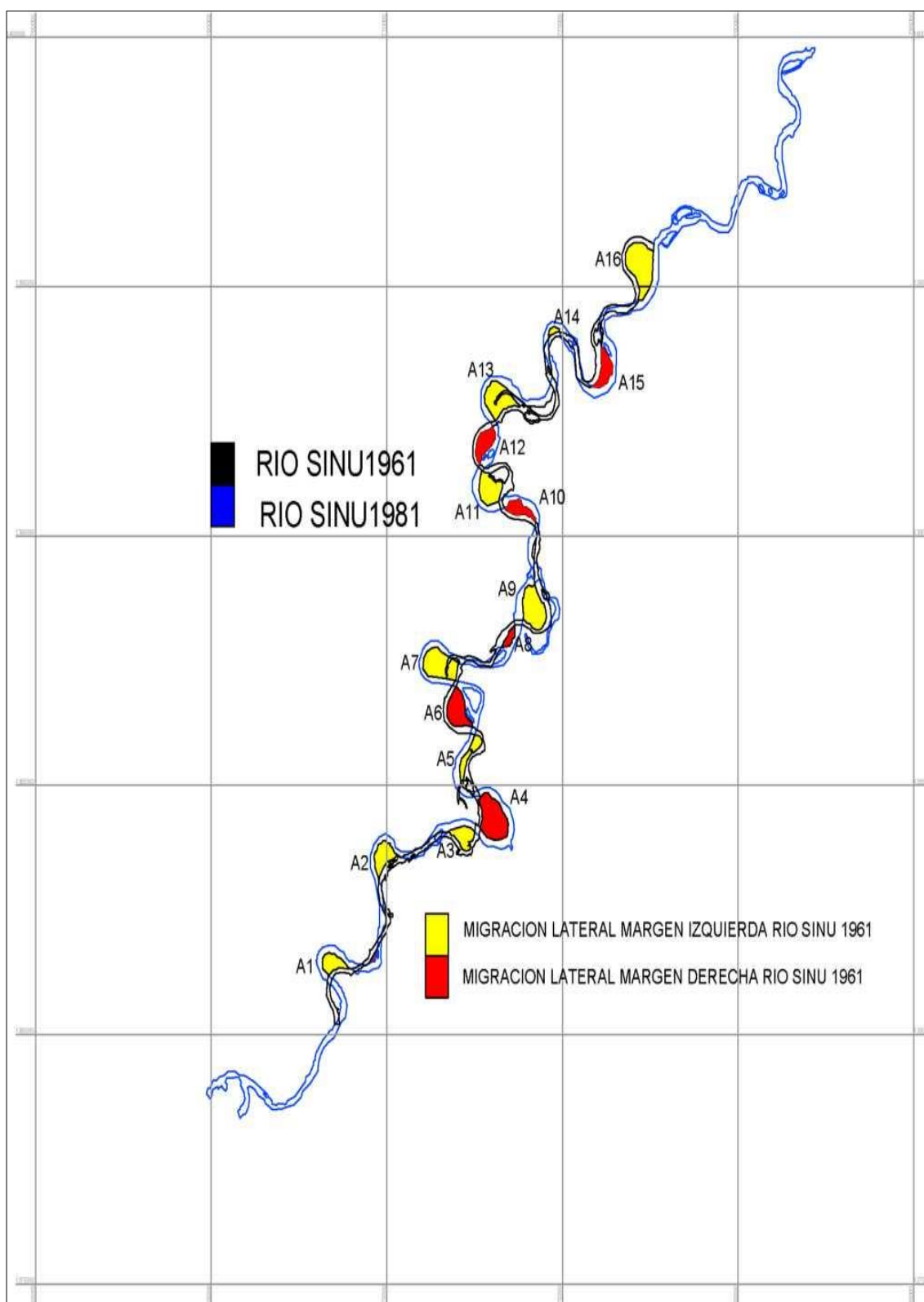


Figura 29. Áreas de migración lateral río Sinú 1961-1981.

En la Tabla 9, se indica que los procesos morfológicos en el río Sinú para el periodo 1961-1981, tienen una alta dinámica al generar por sedimentación áreas de avance calculadas en 1.6 km² y por procesos erosivos alrededor de 2.9 km².

Tabla 8. Áreas de migración lateral sobre el río Sinú (1961-1981)

AREA DE RETROCESO	AREAS	KM ²	AREA DE AVANCE	AREAS	KM ²
	A1	0,193		A4	0,553
	A2	0,183		A6	0,344
	A3	0,213		A8	0,072
	A5	0,167		A10	0,153
	A7	0,449		A12	0,211
	A9	0,443		A14	0,036
	A11	0,318		A15	0,197
	A13	0,392			
	A16	0,54			
	TOTAL	2,898		TOTAL	1,566

- **Distancia relativa sobre el río Sinú (1961-1981)**

Los cambios morfológicos para el río Sinú en diferentes periodos de tiempo, se determina a partir de la línea de referencia común entre las dos formas en planta del río Sinú (1961 y 1981), tal como se observa en la Figura 30.

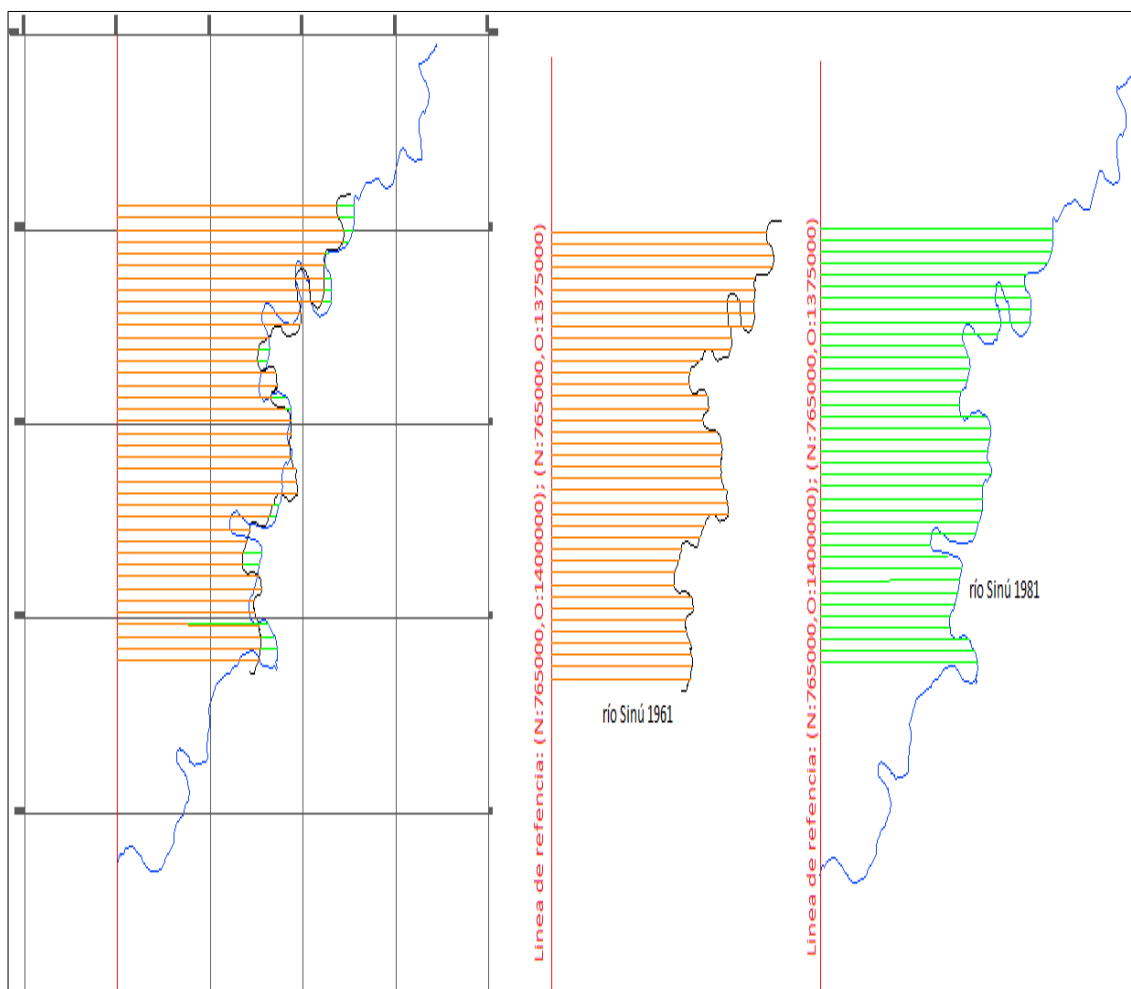


Figura 30. Abscisas proyectadas sobre la forma en planta del río Sinú en 1961 y 1981.

- **Diferencia en la distancia relativa sobre el río Sinú (1961-1981)**

En la Figura 31, se observa el comportamiento que presenta la diferencia en la longitud entre las abscisas proyectadas o distancias relativas del río Sinú para los años 1961 y 1981.

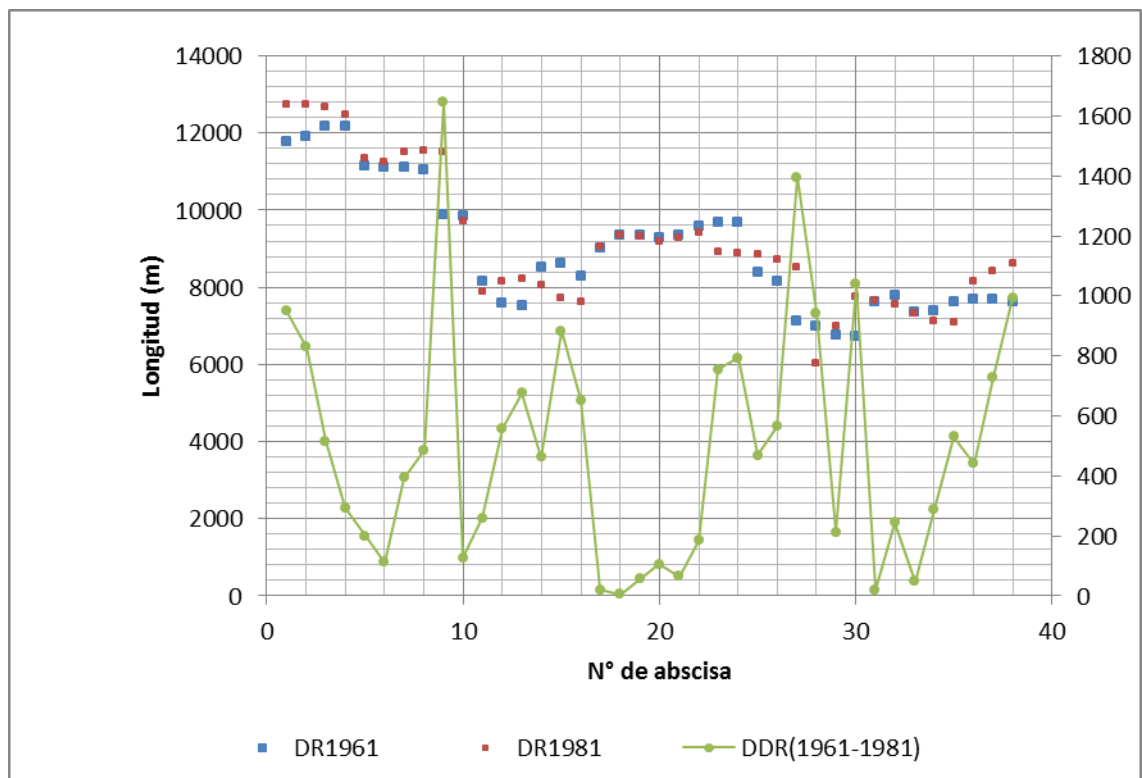


Figura 31. Longitud de abscisas proyectadas sobre el río Sinú (1961-1981).

La media del indicador diferencia en la distancia relativa cuantificado para el río Sinú en el año 1961 y 1981 es de 496.46 m, tal como se indica en la Figura 32.

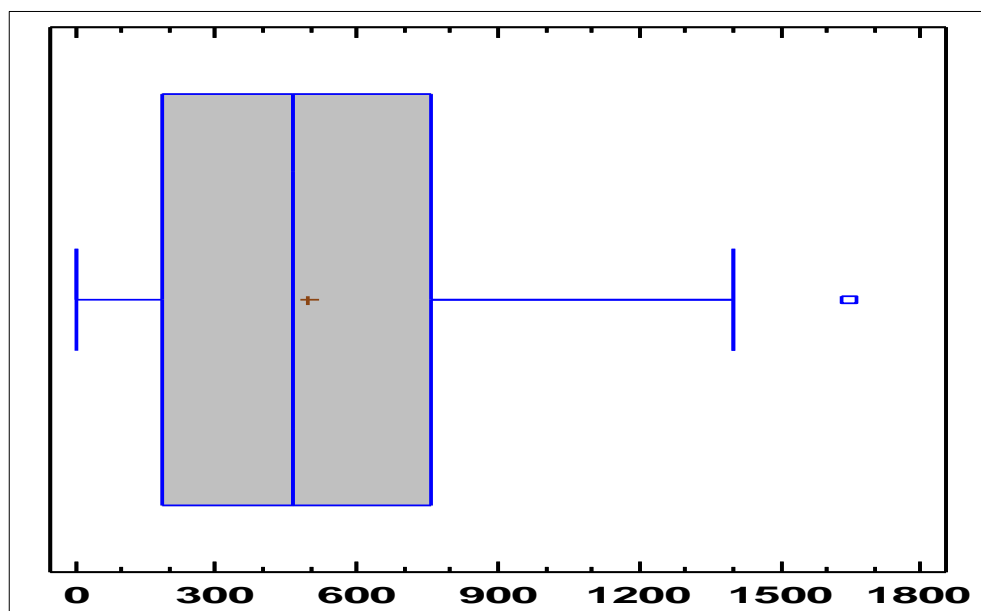


Figura 32. Diferencia en la distancia relativa sobre el río Sinú (1961-1981).

5.3.3.2. Desplazamiento lateral sobre el río Sinú 1981-1988

Al superponer la forma en planta que tiene el río Sinú en los años 1981 y 1988, se obtiene el desplazamiento lateral del meandro. En la Figura 33, se observan las áreas de variación en planta y la conformación de áreas de avance.

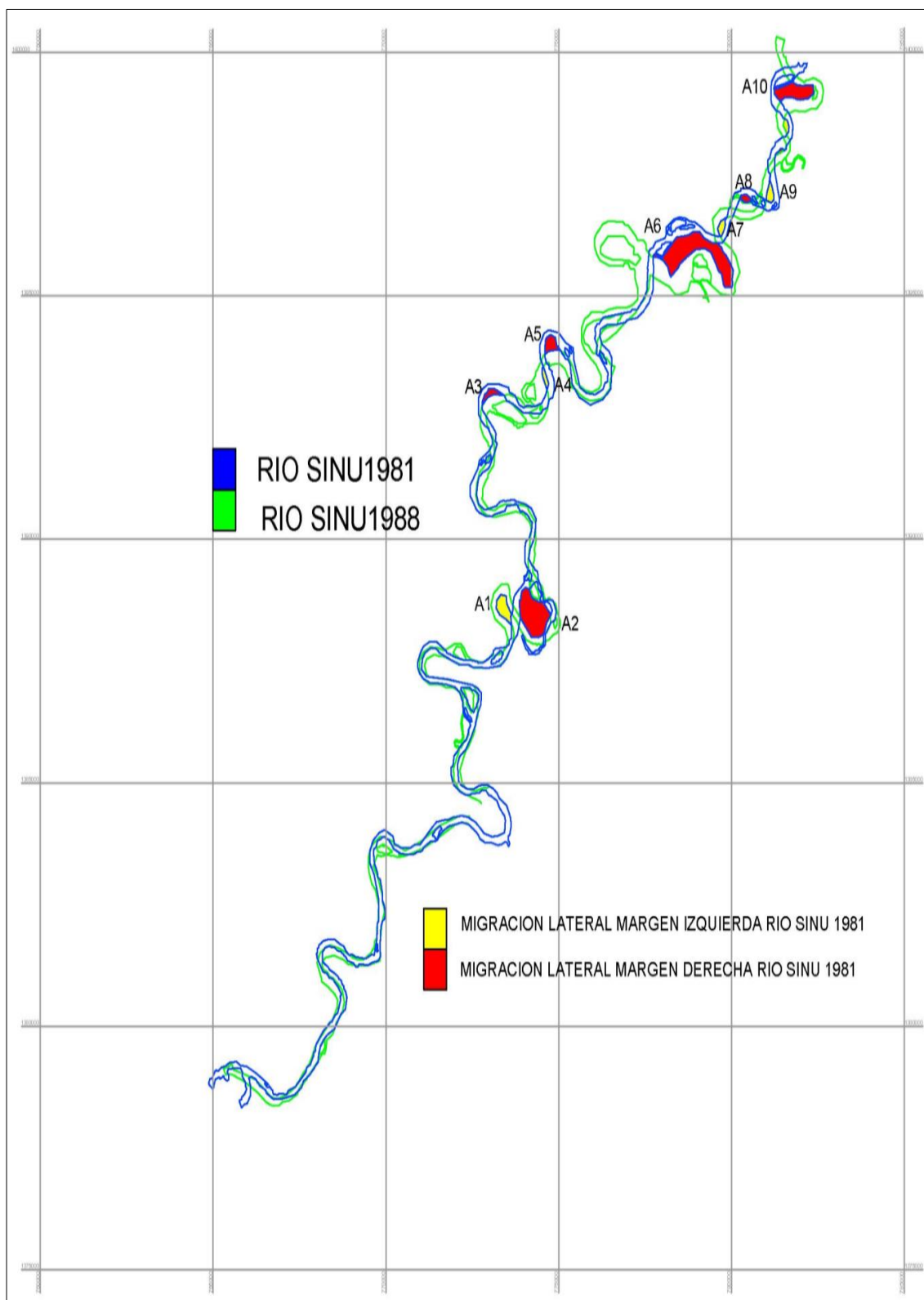


Figura 33. Áreas de migración lateral río Sinú (1981-1988).

La variación en planta del río Sinú para un periodo de 7 años (1981-1988), presenta la conformación de 1.9 km² en áreas de avance, producto de procesos sedimentarios, tal como se indica en la Tabla 10.

Tabla 9. Áreas de migración lateral río Sinú (1981-1988).

Tabla 3. Áreas de migración lateral No Onia (1981-1989).					
AREA DE RETROCESO	AREAS	KM ²	AREA DE AVANCE	AREAS	KM ²
	A1	0,151		A2	0,572
	A4	0,038		A3	0,064
	A7	0,05		A5	0,103
	A9	0,066		A6	0,894
				A8	0,037
				A10	0,302
TOTAL	0,305	TOTAL	1,972		

- **Distancia relativa sobre el río Sinú (1981-1988)**

La línea de referencia común entre las dos formas en planta del río Sinú (1981 y 1988), es la base para determinar los cambios morfológicos presentes en el río Sinú, tal como se observa en la Figura 34.

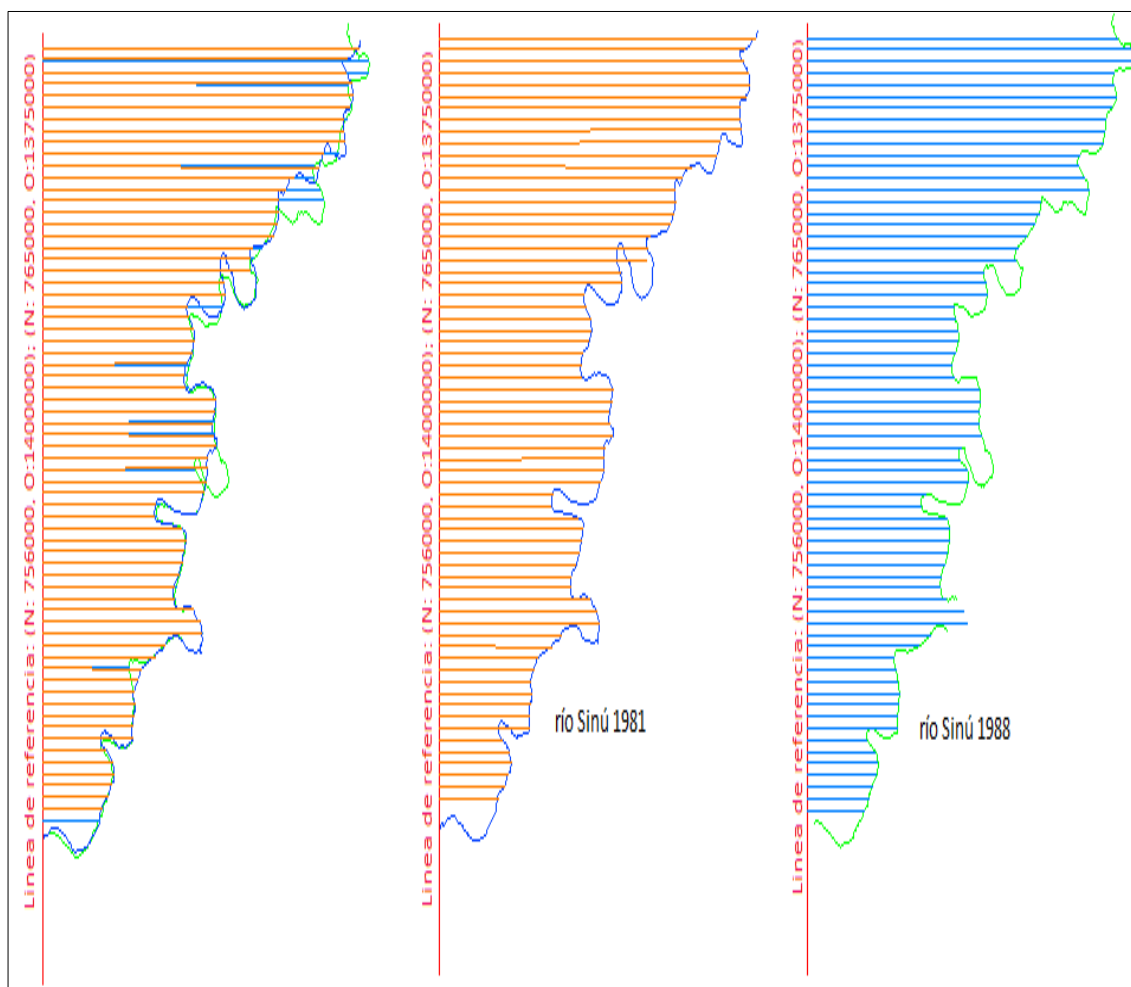


Figura 34. Abscisas proyectadas sobre la forma en planta del río Sinú en 1981 y 1988.

- **Diferencia en la distancia relativa por el río Sinú(1981-1988)**

La Figura 35, indica las longitudes de las abscisas proyectadas sobre el río Sinú para los años 1981 y 1988, las variaciones en las formas en planta del río, se cuantifican a través de la diferencia de longitud entre las abscisas proyectadas.

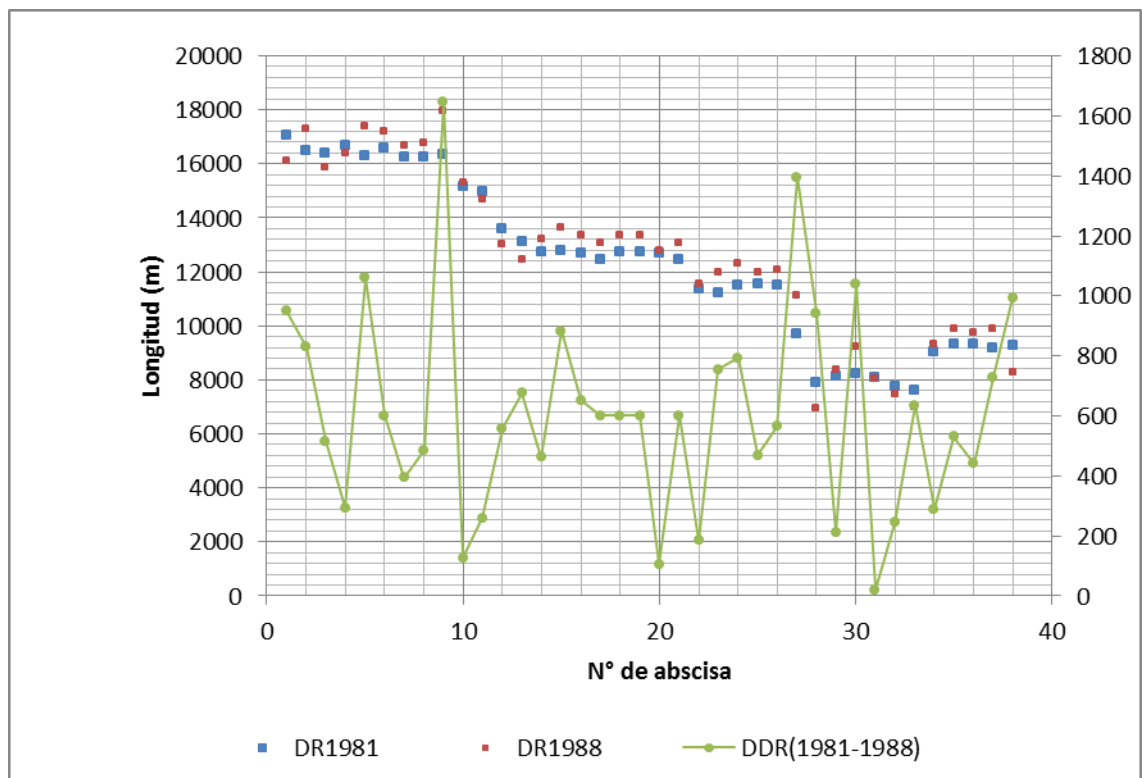


Figura 35. Longitud de abscisas proyectadas sobre el río Sinú (1961-1981).

La media del indicador diferencia en la distancia relativa para el río Sinú en el periodo 1981-1988 es de 608.68 m, tal como se indica en la Figura 36.

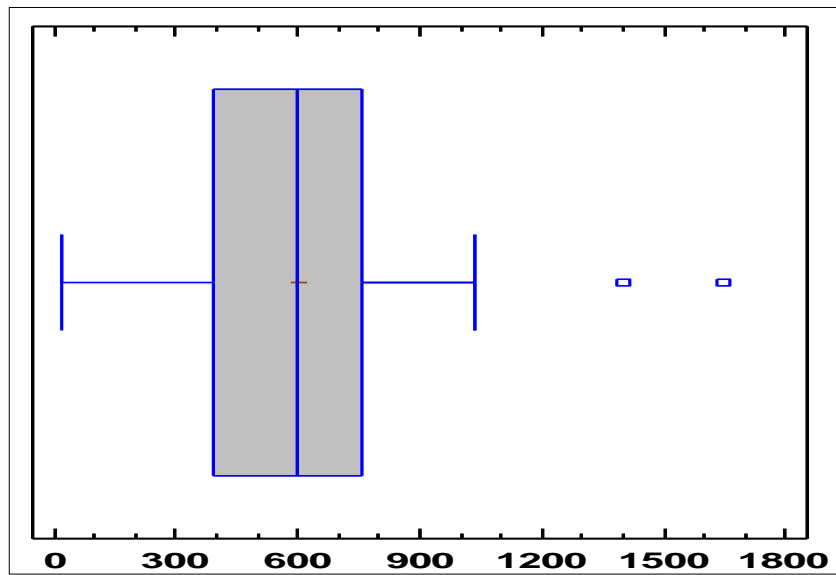


Figura 36. Diferencia en la distancia relativa sobre el río Sinú (1981-1988).

5.3.3.3. Desplazamiento lateral sobre el río Sinú 1988-1994

La superposición en la forma en planta del río Sinú, indica la incidencia de procesos erosivos en la pérdida de áreas. En la Figura 37, se observa el área de mayor retroceso (A5) y en contraste la conformación de pocas áreas de avance.

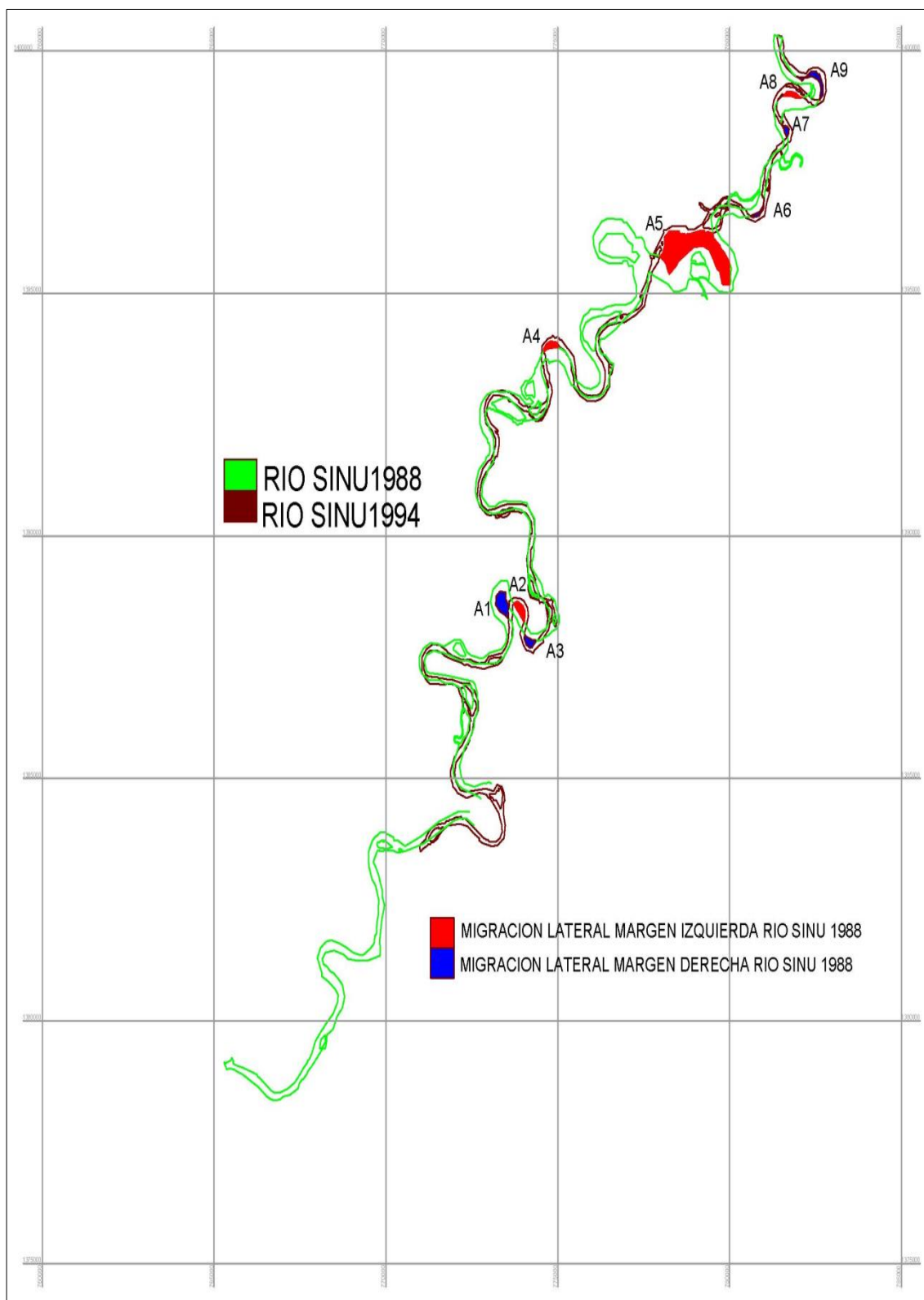


Figura 37. Áreas de migración lateral río Sinú (1988-1994).

En general, para el periodo entre el año 1988 y 1994, se conformaron áreas de avance de 1.7 km². Sin embargo, los procesos erosivos incisivos generan 0.3 km² en áreas de retroceso, tal como se observa en la Tabla 11.

Tabla 10. Áreas de migración lateral río Sinú (1988-1994).

AREA DE RETROCESO	AREAS	KM ²	AREA DE AVANCE	AREAS	KM ²
	A2	0,151		A1	0,572
	A3	0,038		A4	0,064
	A6	0,05		A7	0,103
	A8	0,066		A9	0,894
				A5	0,037
	TOTAL	0,305		TOTAL	1,67

- **Distancia relativa sobre el río Sinú (1988-1994)**

Las formas en planta del río Sinú son analizadas con base en los cambios morfológicos desde una línea de referencia común, tal como se observa en la Figura 38.

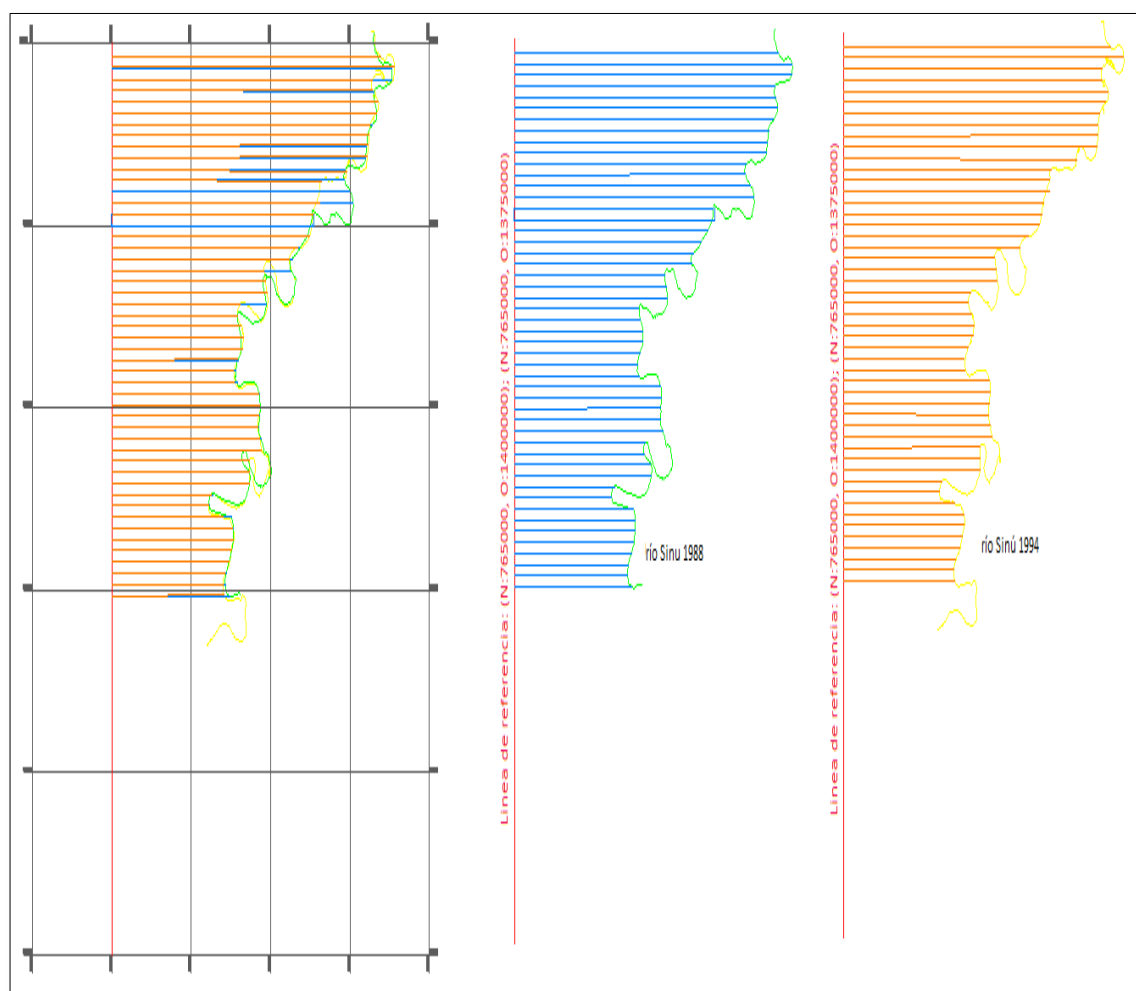


Figura 38. Abscisas proyectadas sobre la forma en planta del río Sinú en 1988 y 1994.

- **Diferencia en la distancia relativa para el río Sinú (1988-1994)**

La Figura 39, indica las longitudes de las abscisas proyectadas sobre el río Sinú para los años 1988 y 1994, la diferencia de longitud entre las abscisas proyectadas, es el valor de la diferencia en la distancia relativa para ese punto.

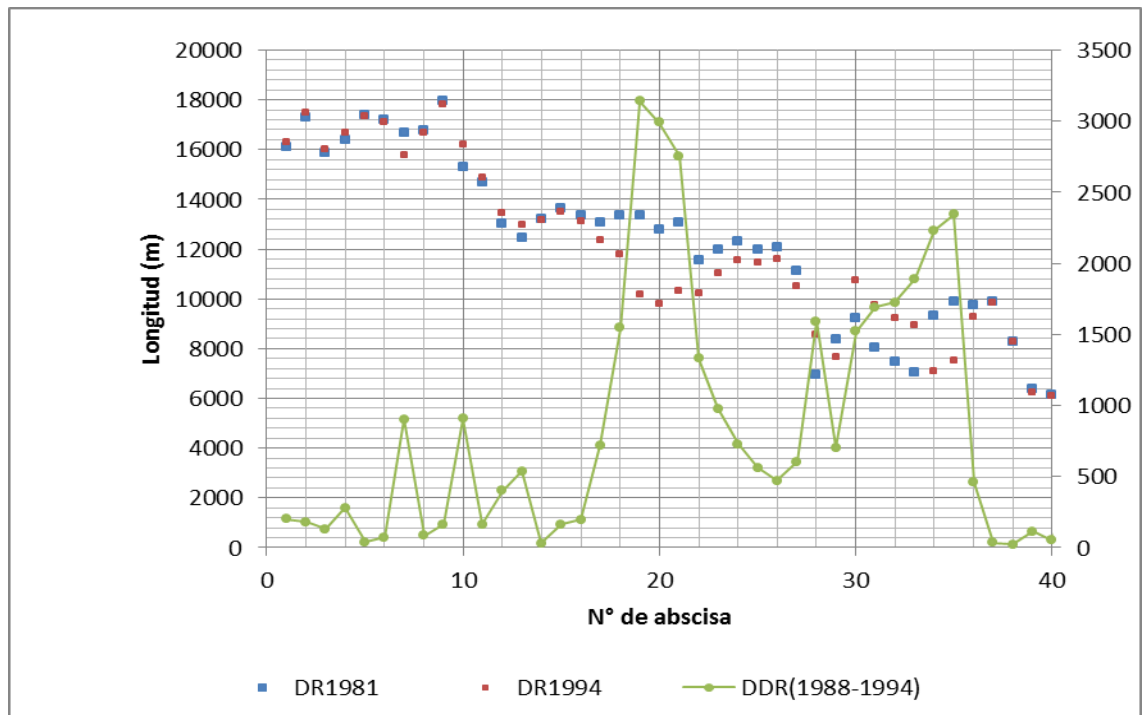


Figura 39. Longitud de abscisas proyectadas sobre el río Sinú (1988-1994).

La media del indicador diferencia en la distancia relativa para el río Sinú en el periodo 1988-1994 es de 788.10 m, tal como se indica en la Figura 40.

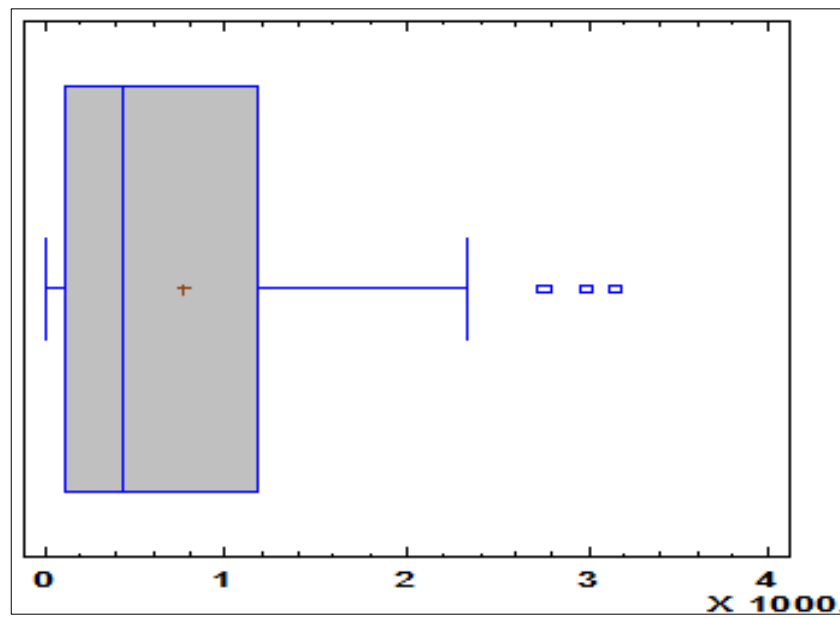


Figura 40. Diferencia en la distancia relativa sobre el río Sinú (1988-1994).

5.3.3.4. Desplazamiento lateral sobre el río Sinú 1999-2005.

La superposición de la formas en planta del río Sinú para el periodo 1999-2005, permite evaluar la dinámica morfológica del río. La Figura 141, determina las áreas donde las orillas avanzan y las áreas de retroceso, una vez iniciada en el año 1999 la operación del embalse multipropósito de Urra.

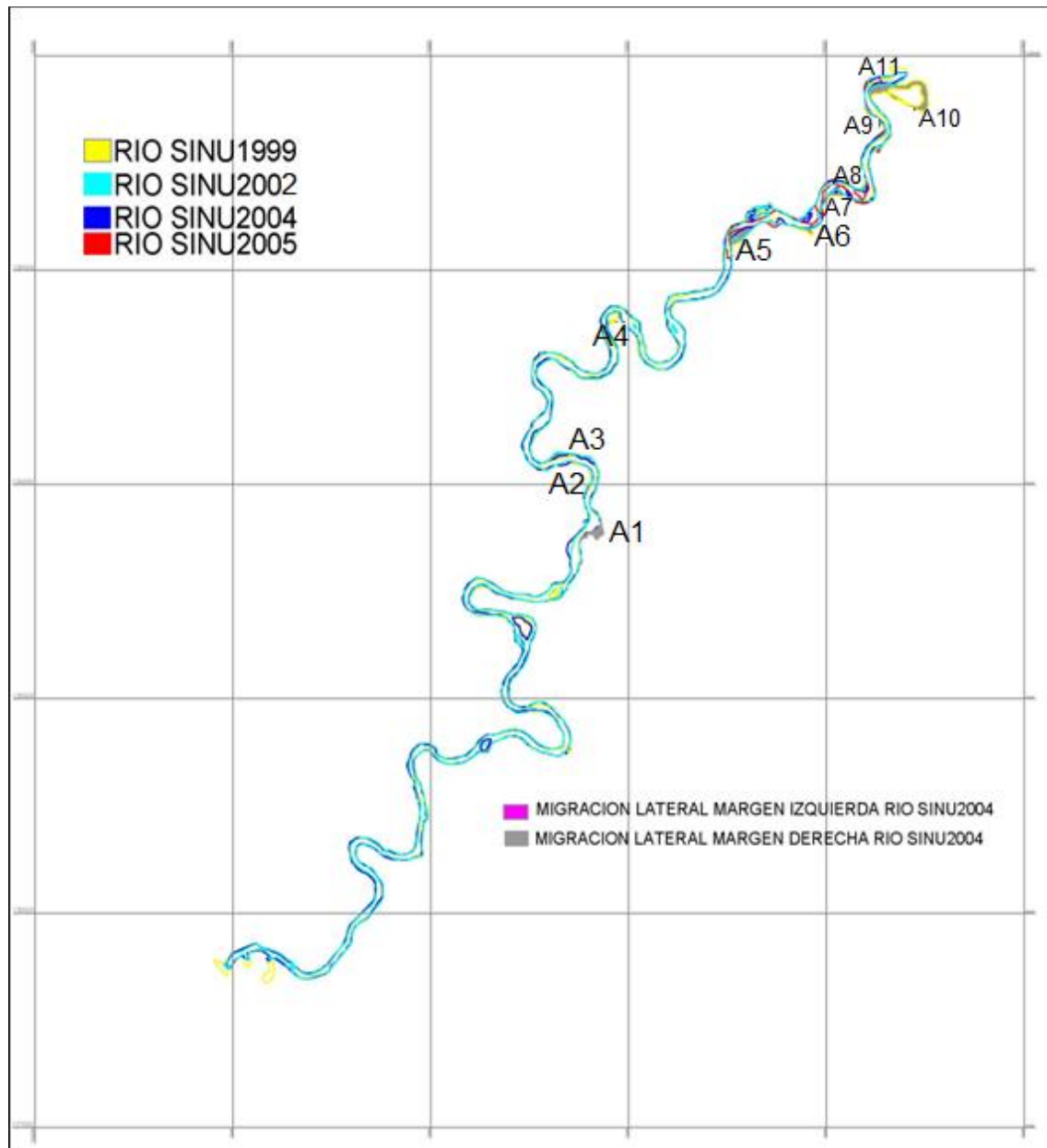


Figura 41. Áreas de migración lateral río Sinú (1999-2011).

El análisis de variación morfológica en planta del río Sinú, indica la estabilidad en su lecho activo y en el ancho del meandro, En la Tabla 12, se observa pequeñas áreas afectadas por procesos erosivos y de sedimentación, con menor incidencia en la conformación de las áreas de avance. Sin embargo, la operación del embalse multipropósito de Urrá, hace pensar en la activación de más áreas de retroceso, al incidir directamente en el transporte de sedimentos en el río.

Tabla 11. Áreas de migración lateral río Sinú (1999- 2005).

AREA DE RETROCESO	AREAS	KM ²	AREA DE AVANCE	AREAS	KM ²
	A1	0,067		A2	0,036
	A3	0,071		A8	0,025
	A4	0,031		A9	0,033
	A5	0,078		A11	0,025
	A6	0,029			
	A7	0,042			
	TOTAL	0,318		TOTAL	0,119

- **Distancia relativa sobre el río Sinú (1999-2002).**

El análisis del indicador distancia relativa para el río Sinú, indica que las formas en planta presentan similar trazado, por lo cual la diferencia entre las longitudes de las abscisas es mucho menor en relación con la etapa pre embalse, tal como se observa en la Figura 42.

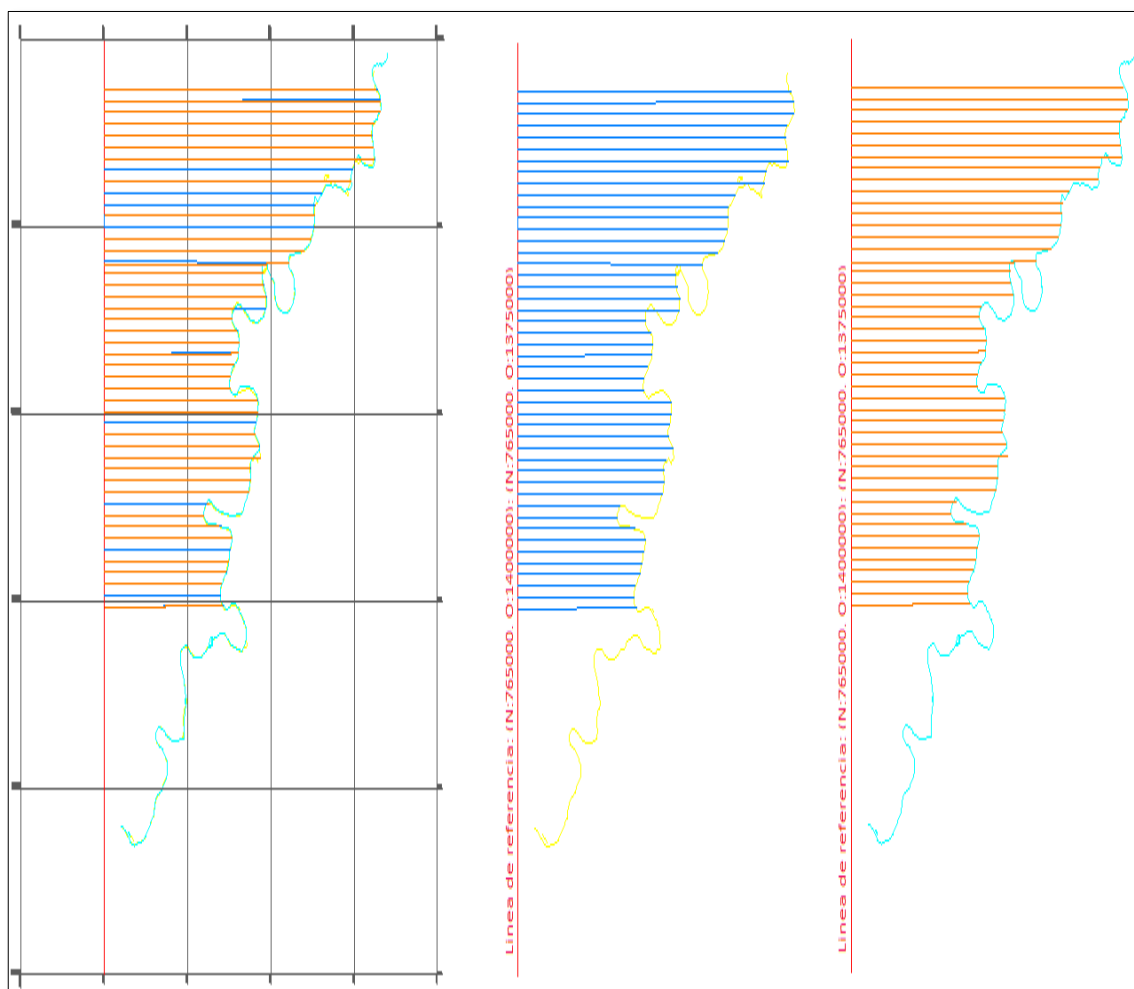


Figura 42. Abscisas proyectadas sobre la forma en planta del río Sinú en 1999 y 2002.

- **Diferencia en la distancia relativa para el río Sinú (1999-2002)**

La Figura 43, indica las longitudes de las abscisas proyectadas sobre el río Sinú para los años 1999 y 2002, la diferencia de longitud entre las abscisas proyectadas, es el valor de la diferencia en la distancia relativa para cada punto.

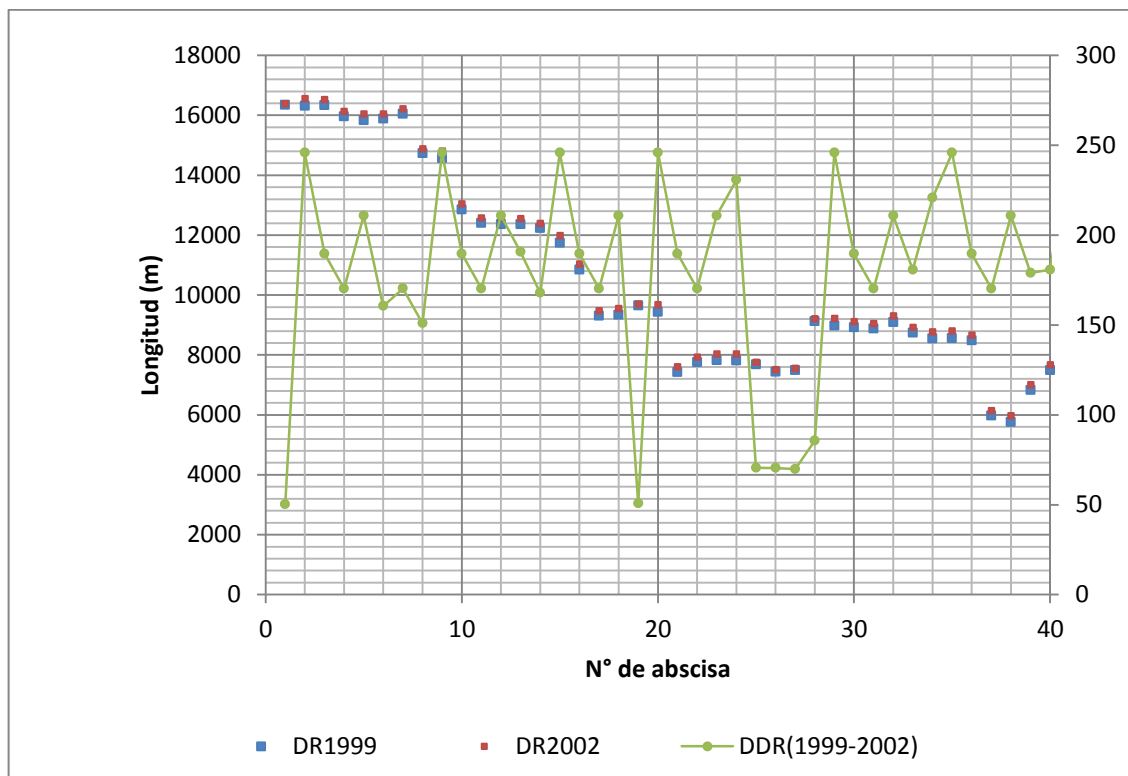


Figura 43. Longitud de abscisas proyectadas sobre el río Sinú (1999-2002).

La media del indicador diferencia en la distancia relativa para el río Sinú en el periodo 1999-2002 es de 178.52 m, tal como se indica en la Figura 44.

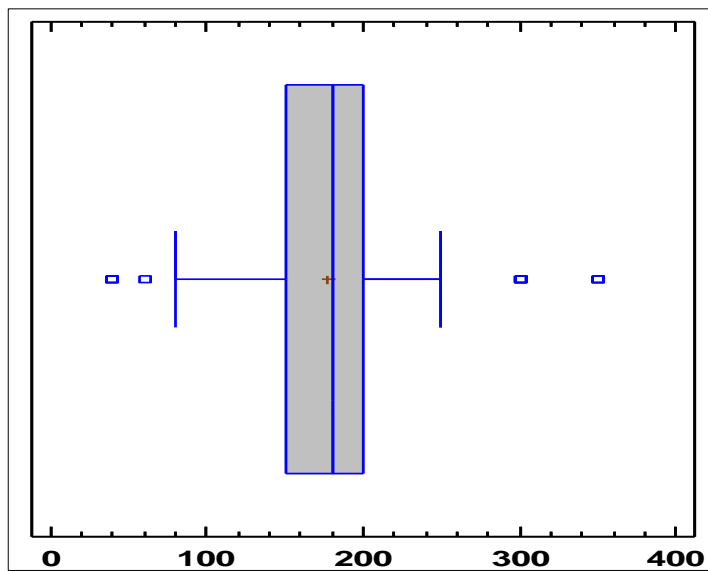


Figura 44. Diferencia en la distancia relativa sobre el río Sinú (1999-2002).

- **Distancia relativa sobre el río Sinú (2002-2004).**

El análisis del indicador distancia relativa para el río Sinú, indica que se presentaron variaciones muy pequeñas en las formas en planta del meandro, por lo tanto las longitudes de las abscisas coinciden en la mayoría del trazado, tal como se observa en la Figura 45.

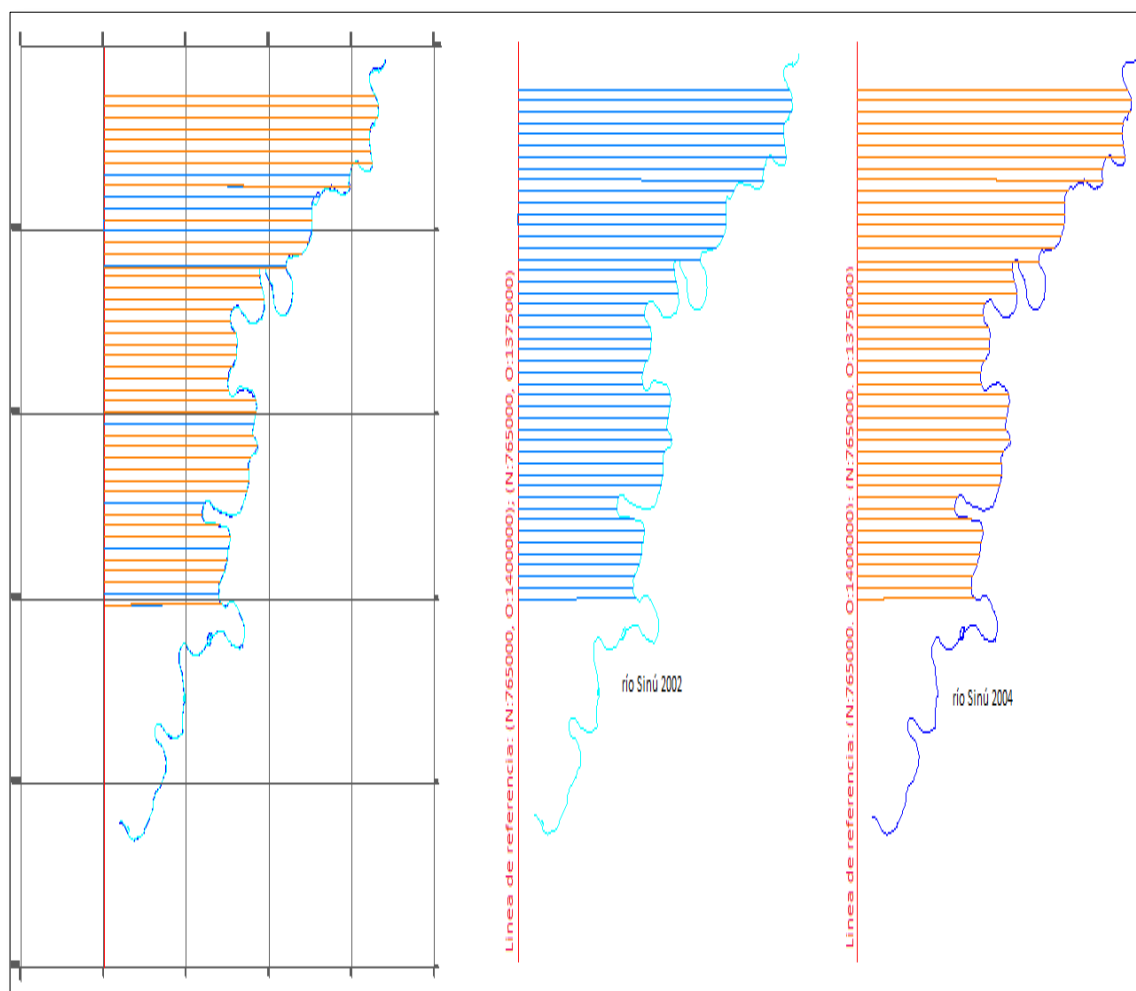


Figura 45. Abscisas proyectadas sobre la forma en planta del río Sinú en 2002 y 2004.

- **Diferencia en la distancia relativa para el río Sinú (2002-2004)**

La Figura 46, indica las longitudes de las abscisas proyectadas sobre el río Sinú para los años 2002 y 2004, se observa la superposicion en las longitudes y la diferencia de longitud entre las abscisas proyectadas, la cual presenta un rango de valores minimos.

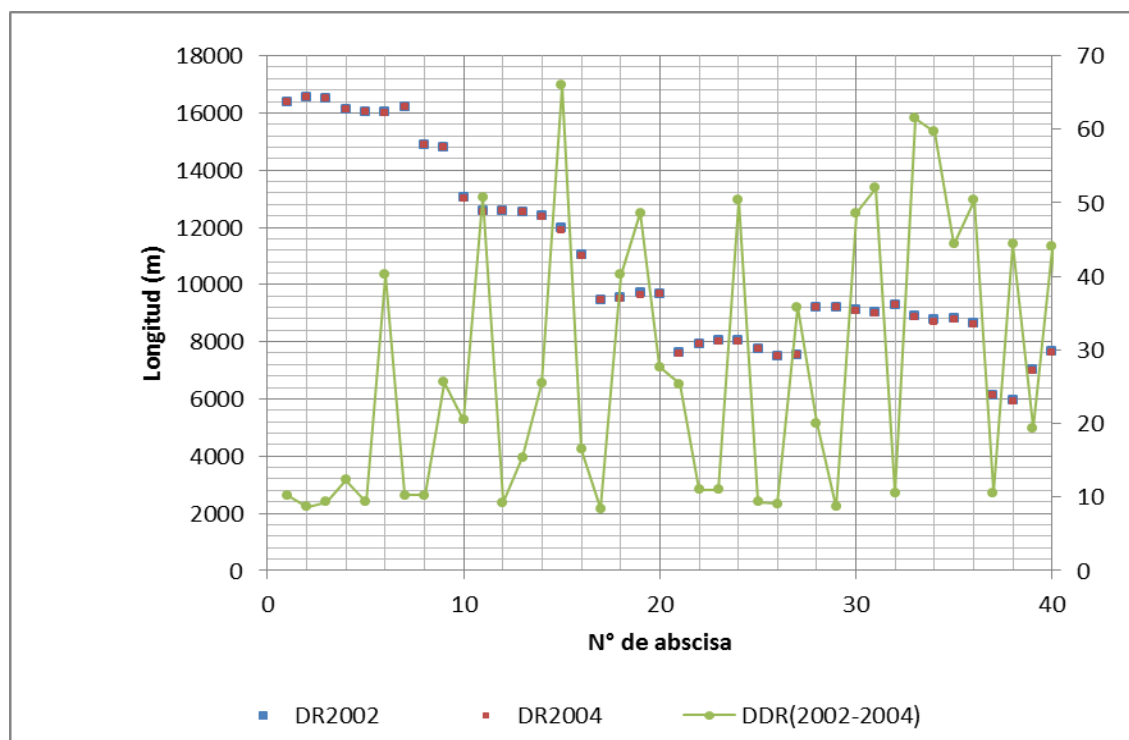


Figura 46. Longitud de abscisas proyectadas sobre el río Sinú (2002-2004).

La media del indicador diferencia en la distancia relativa para el río Sinú en el periodo 2002-2004 es de 25.67 m, tal como se indica en la Figura 47.

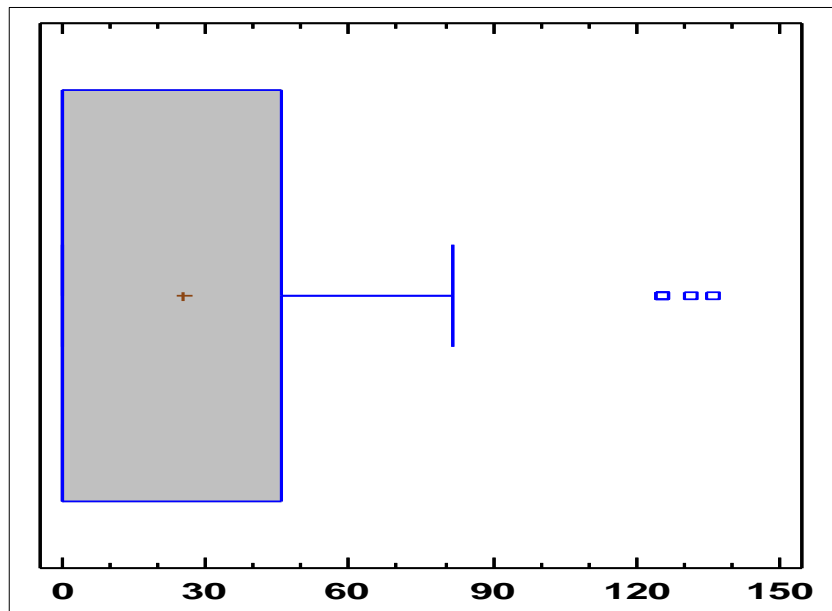


Figura 47. Diferencia en la distancia relativa sobre el río Sinú (2002-2004).

- **Distancia relativa sobre el río Sinú (2004-2005).**

Las variaciones en las formas en planta del meandro para el periodo de análisis (2004-2005) son pequeñas, al coincidir las longitudes de las abscisas en la mayoría del trazado, tal como se observa en la Figura 48.

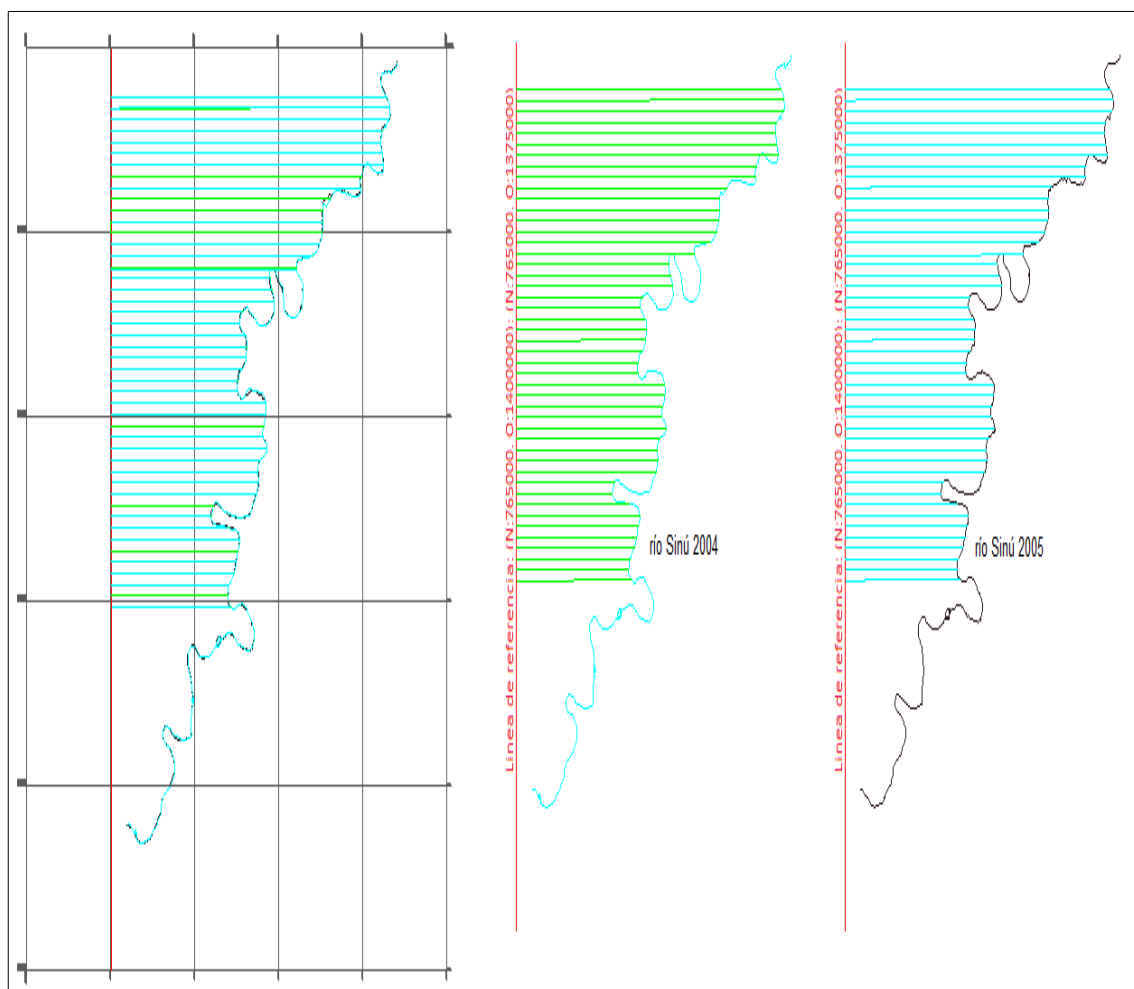


Figura 48. Abscisas proyectadas sobre la forma en planta del río Sinú en 2004 y 2005.

- **Diferencia en la distancia relativa para el río Sinú (2002-2004)**

La Figura 49, se observa la superposición en las longitudes de las abscisas proyectadas sobre el río Sinú para los años 2002 y 2004, la diferencia es mínima entre las longitudes de las abscisas.

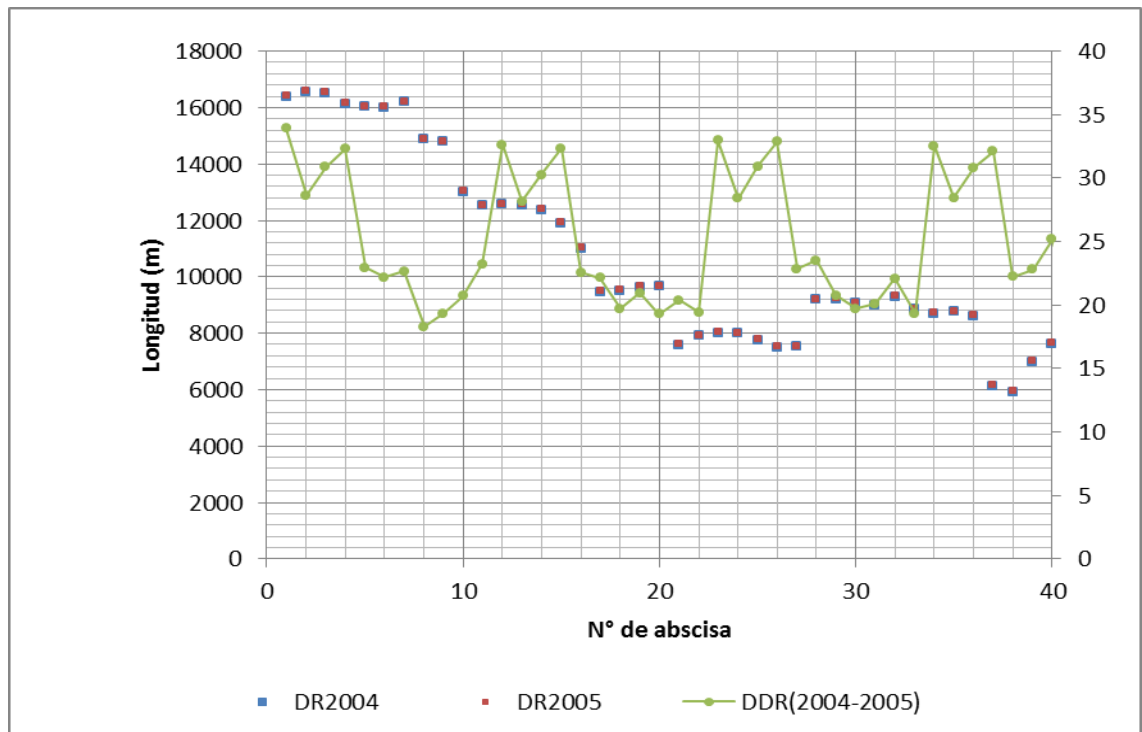


Figura 49. Longitud de abscisas proyectadas sobre el río Sinú (2004-2005).

La media del indicador diferencia en la distancia relativa para el río Sinú en el periodo 2004-2005 es de 25 m, tal como se indica en la Figura 50.

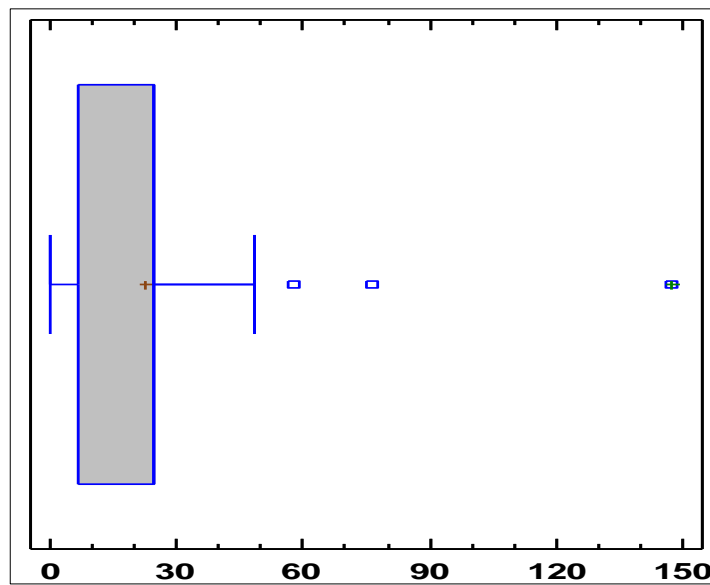


Figura 50. Diferencia en la distancia relativa sobre el río Sinú (2004-2005).

5.3.3.5. Diferencia en la distancia relativa para el río Sinú (1960-2011).

El comportamiento del indicador diferencia en la distancia realtiva se ve influenciado por la puesta en operación del embalse multiproposito de Urrá, tal como se indica en la Figura 51.

La diferencia en la distancia relativa del río Sinú, indica que los desplazamientos morfologicos presentaron mayor actividad en la etapa pre-embalse. Mientras que, en la etapa post- embalse los desplazamiento son menores.

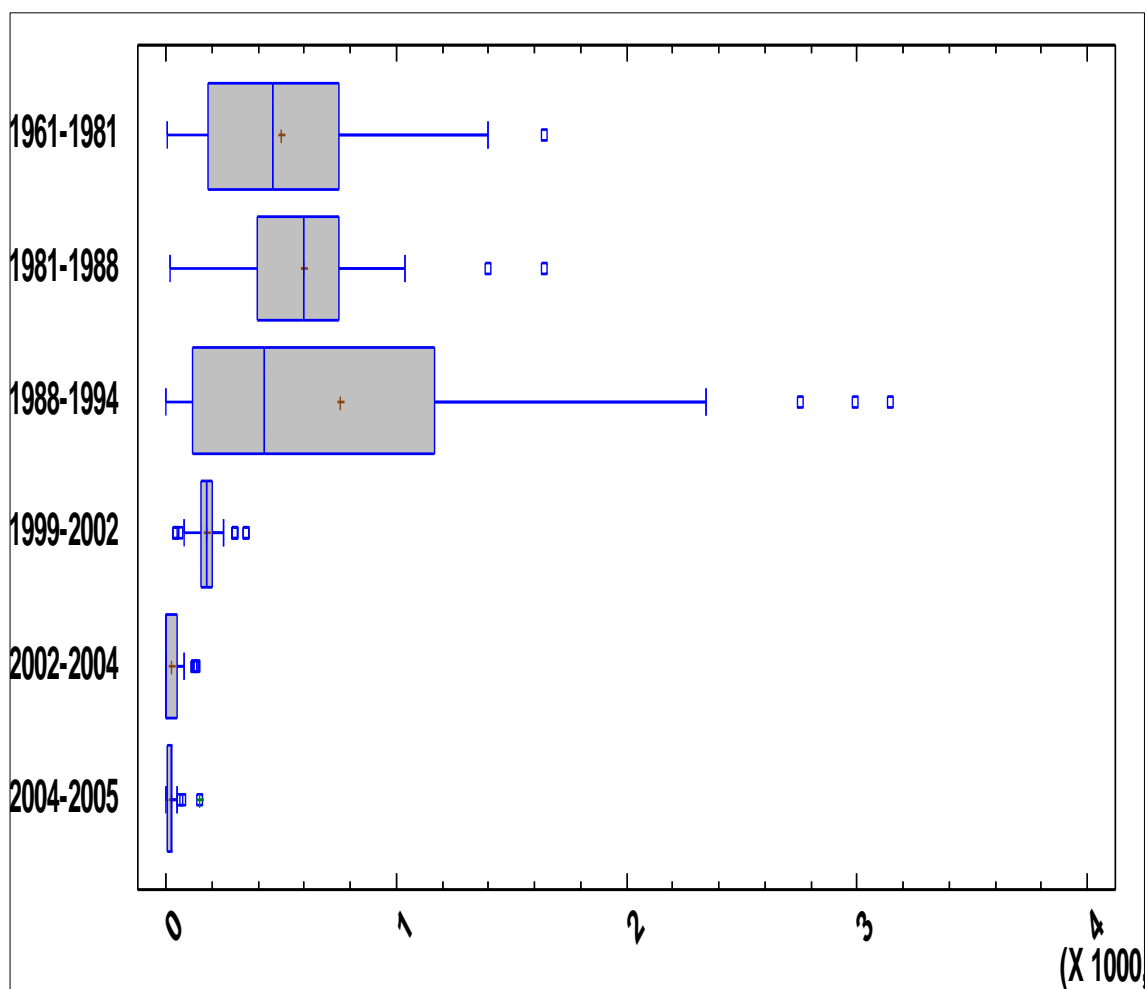


Figura 51. Comportamiento general del indicador diferencia en la distancia relativa (1960-2011).

6. ANÁLISIS DE INDICADORES HIDRO-MORFOLÓGICOS EN EL RÍO SINÚ.

En esta investigación se plantean unos modelos estadísticos que relacionan variables hidrológicas con variables morfológicas, a partir de modelos estadísticos de regresión. Con la finalidad de concebir un modelo simplificado que brinde una aproximación al comportamiento morfológico del cauce, para condiciones hidrológicas futuras.

6.1. Variables hidro-morfológicas del río Sinú.

A partir de la información hidrológica se realizó el análisis sobre la series de tiempo, con la finalidad de seleccionar e identificar las variables detonantes en los procesos de variación morfológicos. En ese contexto, se esperaría que las tasas de variación de caudal (ascenso y descenso), al igual que el comportamiento de los pulsos altos de caudal (número de pulsos y duración), se encuentren relacionadas directamente con los cambios morfológicos, como por ejemplo: La sinuosidad, el factor de migración lateral y la diferencia de la distancia relativa.

6.1.1. Variables morfológicas.

Los indicadores morfológicos analizados comprenden la sinuosidad, el factor de migración lateral y la diferencia de la distancia relativa, los cuales se describen a continuación:

- Factor de migración lateral (FML): Se calcula con base en el promedio anual de la relación entre el radio de curvatura y ancho de canal, dependiendo del rango de valores obtenidos, se eleva a un exponencial determinado.
- La sinuosidad media (S_m): La sinuosidad media se define como el promedio de la sinuosidad anual, la cual es calculada como la relación de la longitud del cauce entre la longitud de su valle.
- Diferencia de la distancia relativa: el indicador se determina como la diferencia entre los valores anuales de la distancia relativa (DR), el cual se es-

tima teniendo en cuenta los thalweg caracterizados en el periodo hidrológico de estudio y determinando las distancias de las mimas, con respecto a una línea de referencia previamente predefinida.

6.1.2. Variables Hidrológicas

Los indicadores hidrológicos seleccionados fueron: Número de pulsos de caudal alto, promedio anual del número de pulsos de caudal altos, duración de pulsos de caudal alto y las tasas de variación de caudal (ascenso y descenso), los cuales se describen a continuación:

- Numero de pulsos de caudal alto (NPCA): La estimación de este parámetro se realizó con base en los cuartiles del 75%, para cada registro en particular. Aquellos pulsos que superan el umbral del 75%, se denominan pulsos de caudal alto. Para un periodo hidrológico determinado el número de pulsos de caudal alto, se calcula como la sumatoria de los pulsos de caudal anuales.
- Promedio anual de pulsos de caudal alto (PAPCA): la estimación de este parámetro para un periodo determinado, se realiza con base en la sumatoria de los pulsos de caudal anuales, este valor se divide entre el número de años del periodo hidrológico analizado.
- Duración de caudales altos (DCA): se realiza la estimación de este parámetro con base con base en los cuartiles del 75%, para cada registro en particular. La duración de los caudales altos se realiza con base en el registro de aquellos caudales que superan el umbral del 75% de forma constante.
- Tasa de ascenso de caudales (TAC): este parámetro se estima con base en la diferencia positiva entre valores de caudales diarios consecutivos.
- Tasa de descenso de caudales (TDC): este parámetro se estima con base en la diferencia negativa entre valores de caudales diarios consecutivos.

6.2. Registro de valores de comportamiento de variables hidromorfológicas.

Los indicadores hidromorfológicos sobre el río Sinú, son definidos sobre intervalos de tiempo, de acuerdo al registro histórico de las formas en planta del río. La Tabla 13, indica los valores para los indicadores hidro –morfológicos presentes en el río Sinú.

Tabla 12. Indicadores hidro- morfológicos sobre el río Sinú.

PERIODOS ANUALES	N° DE PULSOS DE CAUDAL ALTO	PROMEDIO POR AÑO DEL N° DE PULSOS DE CAUDAL ALTO	DURACION CAUDAL ALTO (Días)	TASA DE ASCENSO DE CAUDAL (m ³ /s/día)	TASA DE DESCENSO DE CAUDAL ((m ³ /s/día)	FACTOR DE MIGRACION LATERAL (m/año)	Sm	Diferencia en la distancia relativa (m)
1962-1981	401	20	3	95,5	66,55	0,37	1,9	496,46
1982-1988	135	19	3,41	86,3	53,14	0,29	2	608,68
1989-1994	123	21	2,22	73	46,33	0,28	2,11	788,10
1999-2002	108,5	27,12	2,13	87,75	67,12	0,38	1,86	178,52
2002-2004	38	19	2,45	77	61	0,37	1,87	25,67
2004-2005	22	22	2	86	60	0,37	1,87	25

6.3. Análisis de colinealidad entre variables

En el análisis de los indicadores hidromorfológicos presentes en río Sinú, se observa un comportamiento similar entre las tasas de variación de caudal, tal como se indica en la Figura 52.

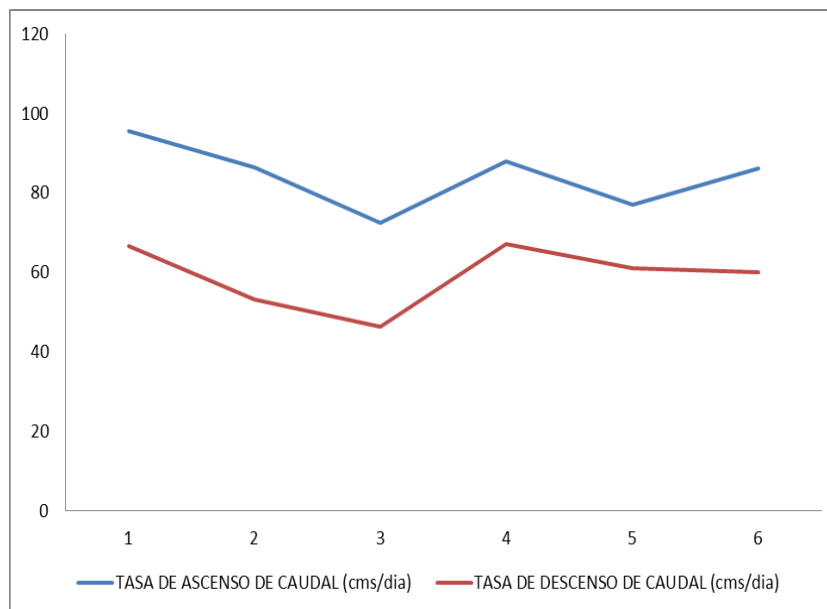


Figura 52. Comportamiento de las tasas de variación de caudales sobre el río Sinú.

Las tasas de variación de caudal son asociadas a procesos de erosión superficial y denudación de suelos, fenómenos complejos que afectan la dinámica morfológica de un cauce.

La velocidad y el esfuerzo cortante son los principales parametros a los que esta sometido un talud, en el control de erosion de río. Las tasas de ascenso de caudal, provienen de la diferencia positiva entre caudales consecutivos, cuando se registra un incremento en los niveles de un río, se desarrolla una fuerza que actúa en la dirección del flujo sobre el lecho, esta fuerza de fricción llamada fuerza tractiva o esfuerzo cortante que por efecto de la velocidad del flujo, genera la potencia de una corriente (Potencia Hidráulica), se relaciona directamente con procesos erosion superficial.

Por su parte, las tasas de descenso de caudal son calculadas a partir de la diferencia negativa entre caudales consecutivos, los descensos de caudal reducen la presión de agua intersticial (presión neutra), que conlleva a una transferencia de carga al esqueleto del suelo (esfuerzo efectivo) y la subsecuente reducción de volumen (hundimiento de la superficie del terreno). De acuerdo a lo anterior, el desequilibrio de presiones ocasionado por la diferencia de nivel de agua en la columna de suelo y el nivel de agua externo, genera un flujo descendente hacia el exterior de la columna de suelo, lo que genera un decrecimiento en la presión del agua alojada en los poros del suelo, que es numéricamente igual al incremento en

el esfuerzo efectivo en la masa de suelo, lo cual deriva en deformación del suelo, Terzaghi (1926).

Se determina el índice de correlación de Pearson para descartar el fenómeno de confusión y de colinealidad entre las variables tasa de ascenso y la tasa de descenso de caudal, tal como se indica en la Figura 53.

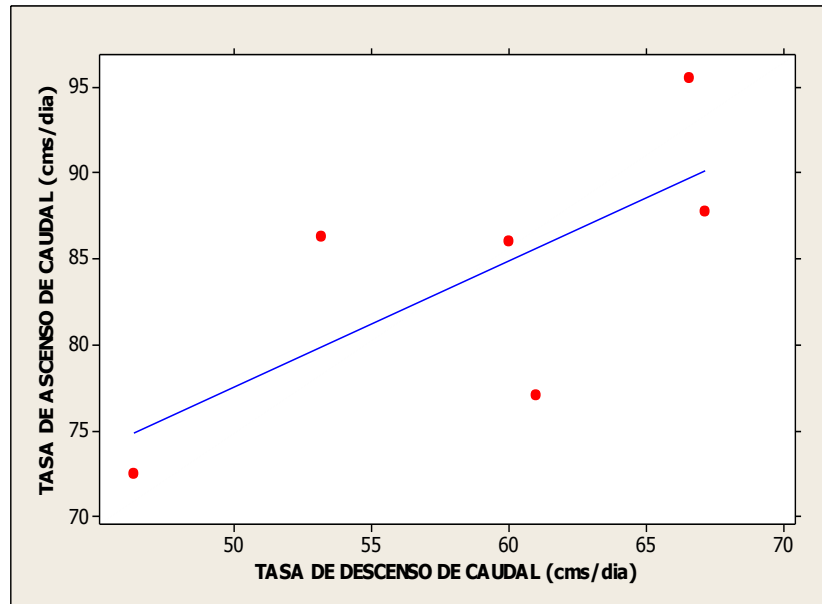


Figura 53. Colinealidad entre variables del modelo (tasa de ascenso y descenso de caudales).

El índice de correlación de Pearson en 0.721, denota la existencia de una fuerte relación lineal entre las tasas de variación en el caudal, lo que conlleva en un principio a la imposibilidad de determinar cuál de las dos variables es responsable de la relación lineal con las variables morfológicas independientes. Sin embargo, la experiencia empírica acompañada de la teoría hidro- sedimentológica, indica que las tasas de ascenso de caudal se relacionan con procesos erosivos superficiales y no con la capacidad denudativa de los suelos, lo cual restringe este parámetro de los modelos más afectados por colinealidad.

7. DISEÑO DE MODELOS ESTADÍSTICOS

7.1. Modelo lineal para el factor de migración lateral

La hipótesis indica que el factor de la migración lateral depende de variables hidrológicas, tales como la cantidad de pulsos altos de caudal, el promedio de pulsos altos generados anualmente, el tiempo que permanecen los caudales extremadamente altos, así como también, las tasas de descenso de los caudales. De igual forma, se explora la posibilidad que una combinación entre las variables hidrológicas tenga incidencia directa en el factor de migración lateral.

7.1.1 Selección del modelo

Las variables independientes del factor de migración lateral, son determinadas a través de selección de mejores subconjuntos y la regresión paso a paso (stepwise).

El procedimiento selección de mejores subconjuntos, está diseñado para ayudar a seleccionar las variables independientes a usar al construir un modelo de Regresión Múltiple para predecir la variable cuantitativa dependiente factor de migración lateral (FML).

Para el análisis de los mejores subconjuntos las variables independientes se denotarán con las siguientes constantes: A=Número de pulsos altos de caudal, B=Promedio anual de pulsos de caudal altos, C=Duración de caudales altos y D=Tasa de descenso de caudal. Se evalúan 6 casos completos y 16 modelos ajustados, tal como se indica en la Tabla 14.

Tabla 13. Mejores subconjuntos para la regresión múltiple del factor de migración lateral.

		<i>R-Cuadrada</i>		<i>Variables</i>
<i>CME</i>	<i>R-Cuadrada</i>	<i>Ajustada</i>	<i>Cp</i>	<i>Incluidas</i>
0,00194468	0,0	0,0	2974,86	
0,00194468	20,0	0,0	2958,06	A
0,00194468	20,0	0,0	2533,01	B
0,00194468	20,0	0,0	2586,89	C
0,000348121	85,68	82,098	424,60	D
0,00194468	40,0	0,0	2470,87	AB
0,00194468	40,0	0,0	2264,14	AC
0,000327425	89,89	83,16	300,93	AD
0,00194468	40,0	0,0	2453,74	BC
0,000464133	85,68	76,13	426,57	BD
0,000177084	94,53	90,89	162,75	CD
0,00194468	60,0	0,0	2206,7	ABC
0,000467199	90,39	75,97	288,26	ABD
0,000259541	94,66	86,65	161,02	ACD
	99,91	99,78	4,62	BCD
	99,96	99,83	5,0	ABCD

El modelo seleccionado en la regresión stepwise, contiene tres (3) variables independientes con p-valor menor de 0.05, un estadístico bondad de ajuste (r^2) de 99% y un Cp de mallows de 4. La Tabla 15, indica la regresión stepwise aplicada en el modelo de factor de migración lateral.

Tabla 14. Stepwise para el factor de migración lateral.

Términos candidatos: NPCA. PAPCA. DCA. TDC						
	-----Paso 1-----		-----Paso 2-----		-----Paso 3-----	
	Coef	P	Coef	P	Coef	P
Constante	0,0488		0,1159		0,2137	
TDC	0,00508	0,008	0,004965	0,007	0,005632	0,001
DCA			-0,0238	0,115	-0,03842	0,003
PAPCA					-0,004685	0,008
S	0,0186580		0,0133073		0,0020673	
R-cuad.	85,68%		94,54%		99,91%	
R-cuad. (ajustado)	82,10%		90,89%		99,78%	
R-cuad. (pred)	72,85%		81,37%		98,98%	
Cp de Mallows	424,60		162,75		4,62	
α a entrar = 0,15. α a retirar = 0,15						

El modelo seleccionado en la regresión stepwise, utiliza como variables dependientes la tasa de descenso de caudal (TDC), el promedio anual de los pulsos de caudal alto (PAPCA) y la duración de caudales altos (DCA), validados a través de una regresión lineal múltiple, la ecuación del modelo planteado presenta la siguiente forma:

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 * TDC + \hat{\beta}_2 * PAPCA + \hat{\beta}_3 * DCA + \varepsilon \quad (15)$$

En la Tabla 16, se indican los estadísticos para el nuevo modelo de regresión lineal múltiple estimado para el factor de migración lateral (FML).

Tabla 15. Regresión lineal múltiple estimada para el factor de migración lateral (FML).

Término	Coef	EE del coef.	IC de 95%	Valor T	Valor p
Constante	0,214	0,0121	(0,1615. 0,2659)	17,6	0,003
PAPCA	-0,004	0,0004	(-0,006508. -0,002862)	-11,06	0,008
DCA	-0,038	0,00214	(-0,04761. -0,02924)	-17,99	0,003
TDC	0,005	0,00013	(0,005072. 0,006192)	43,27	0,001

El modelo de regresión múltiple para el factor de migración lateral (FML), presenta una desviación estándar (s) de 0,0020, con un r^2 de 99,91% y un r^2 ajustado de 99,78%.

7.1.2 Análisis de varianza

El modelo estocástico que mejor ajusta a los datos, es un modelo de carácter empírico que presenta la siguiente estructura:

$$FML = 0,214 - 0,004 * PAPCA - 0,038 * DCA + 0,005 * TDC \quad (16)$$

Los resultados de análisis de varianza para el modelo de regresión múltiple estimado para el factor de migración lateral indica que las tres variables independientes analizadas son significativas, tal como se observa en la Tabla 17.

Tabla 16. Análisis de varianza para el modelo lineal FML

Fuente	GL	SC Sec.	Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	3	0,0097	99,91%	0,009715	0,003238	757,74	0,001
PAPCA	1	0,0014	14,90%	0,000523	0,000523	122,31	0,008
DCA	1	0,0002	2,73%	0,001384	0,001384	323,81	0,003
TDC	1	0,0080	82,28%	0,008001	0,008001	1872,14	0,001
Error	2	0,0001	0,09%	0,000009	0,000004		
Total	5	0,0097	100,00%				

7.1.3 Análisis de residuos

Los residuos no presentan tendencias, ni curvas en la gráfica y la dispersión vertical de los datos no varía mucho con la horizontal, tal como se observa en la Figura 54.

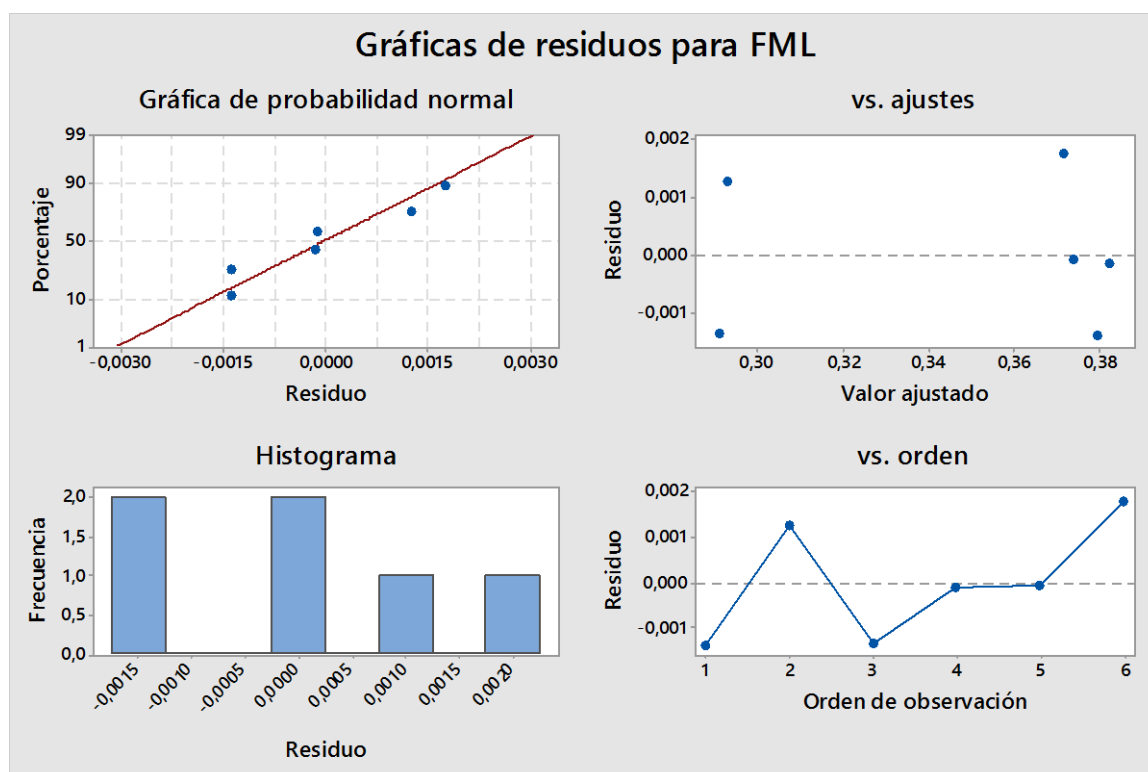


Figura 54. Análisis de residuos para el modelo lineal del FML.

7.1.4 Tasas de variación

La Tabla 18, indican las tasa de variación de los resultados teóricos y los estimados a través del modelo lineal para el factor de migración lateral (FML).

Tabla 17. Tasas de variación para el modelo lineal del FML

DCA	PAPCA	TDC	FML- TEORICO	FML- ESTA- DISTICO	TASAS DE VARIACION	
					%M TEORICO	% M ESTIMADO
3	20	66,55	0,3782	0,380		
3,41	19	53,14	0,2942	0,293	-28,53	-29,56
2,22	21	46,33	0,2896	0,291	-1,60	-0,69
2,1375	27,125	67,125	0,3824	0,383	24,27	23,94
2,45	19	61	0,3740	0,374	-2,25	-2,26
2	22	60	0,3735	0,372	-0,14	-0,65
					U de Theil	0,020

El indicador U de Theil registra un valor de 0.020, lo que indica un 2% en la desigualdad del valor observado sobre la predicción. En la Figura 55, se observa el diagrama de Theil para el modelo lineal del factor de migración lateral.

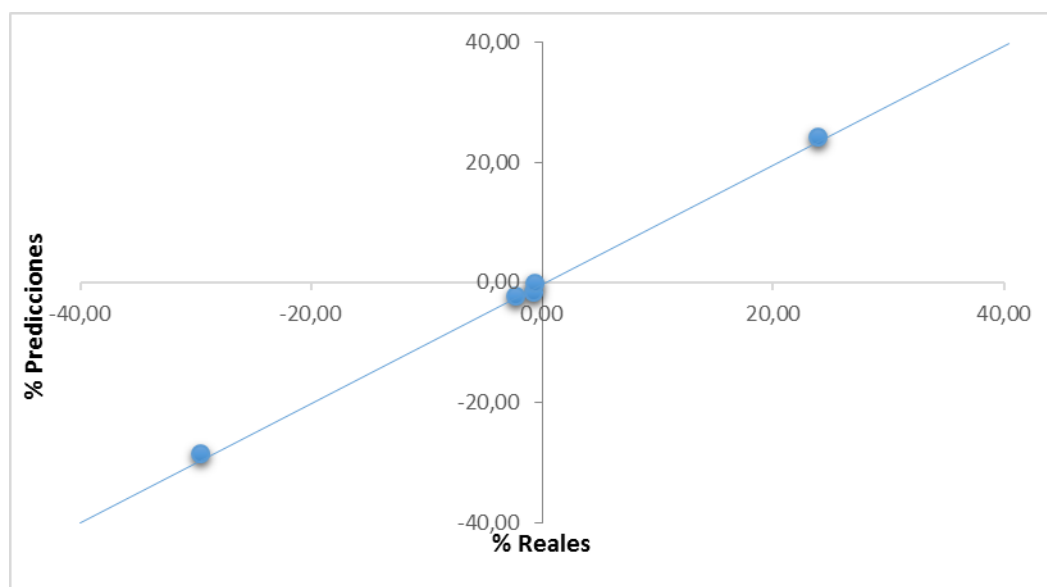


Figura 55. Diagrama de theil para el modelo lineal del FML

7.1.5 Intervalos de predicción.

Los intervalos de predicción con un 90% de confianza, se establecen para el modelo lineal de regresión múltiple estimado para el factor de migración lateral (FML), tal como se indica en la Figura 56.

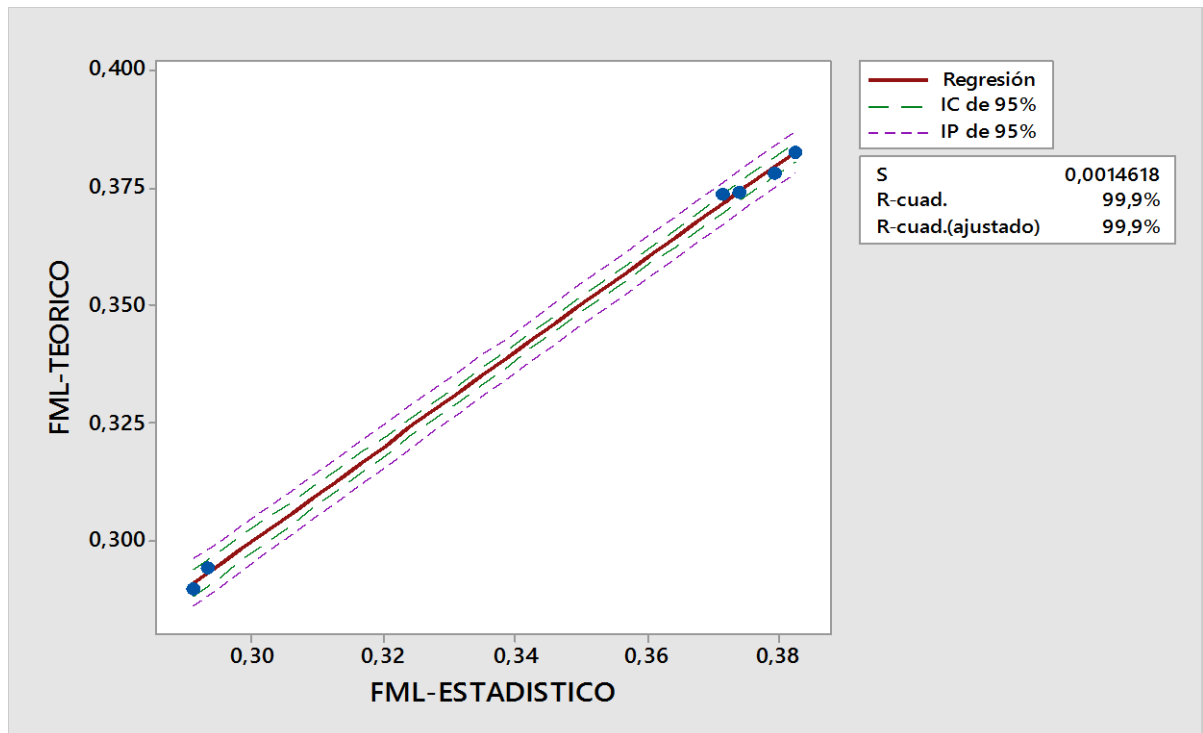


Figura 56. Intervalos de predicción para el modelo lineal del FML

7.2. Modelo de lineal para la sinuosidad.

La hipótesis del modelo estadístico planteado indica que el sinuosidad (S_m) depende de variables hidrológicas, tales como la cantidad de pulsos altos de caudal, el promedio de pulsos altos generados anualmente, el tiempo que permanecen los caudales extremadamente altos, así como también, las tasas de descenso de los caudales. De igual forma, se explora la posibilidad que una combinación entre las variables hidrológicas tenga incidencia directa en sinuosidad (S_m).

7.2.1. Selección del modelo

Las variables independientes de la sinuosidad (S_m), son determinadas a través de la selección de mejores subconjuntos y la regresión paso a paso (stepwise). El procedimiento selección de mejores subconjuntos, está diseñado para ayudar a seleccionar las variables independientes implementadas al construir un modelo de regresión múltiple para predecir la variable cuantitativa dependiente sinuosidad (S_m).

Para el análisis de los mejores subconjuntos las variables independientes se denotaran con las siguientes constantes: A=Número de pulsos altos de caudal, B=Promedio anual de pulsos de caudal altos, C=Duración de caudales altos y D=Tasa de descenso de caudal. Se evalúan 6 casos completos y 16 modelos ajustados. Tal como se indica en la Tabla 19, los modelos con mejor comportamiento son ABD y ACD.

Tabla 18. Selección de mejores subconjuntos para la sinuosidad.

		<i>R-Cuadrada</i>		<i>Variabes</i>
<i>CME</i>	<i>R-Cuadrada</i>	<i>Ajustada</i>	<i>Cp</i>	<i>Incluidas</i>
0,00955874	0,0	0,0	86,67	
0,00955874	20,0	0,0	88,52	A
0,00955874	20,0	0,0	79,78	B
0,00955874	20,0	0,0	85,64	C
0,00188523	84,22	80,27	12,30	D
0,00955874	40,0	0,0	81,77	AB
0,00955874	40,0	0,0	87,19	AC
0,000789226	95,04	91,74	4,491	AD
0,00955874	40,0	0,0	81,78	BC
0,0024273	84,76	74,60	13,81	BD
0,00228885	85,63	76,05	13,02	CD
0,00955874	60,0	0,0	83,77	ABC
0,000269535	98,87	97,18	3,022	ABD
0,000965664	95,95	89,89	5,664	ACD
0,00258914	89,16	72,91	11,82	BCD
0,000527091	98,89	94,48	5,0	ABCD

El modelo seleccionado en la regresión stepwise, contiene tres (3) variables independientes (Número de pulsos altos de caudal, Promedio anual de pulsos de caudal altos, Tasa de descenso de caudal), un p-valor menor de 0.05, un estadís-

tico bondad de ajuste (r^2) de 97% y un Cp de mallows de 3. La Tabla 20, indica la regresión stepwise aplicada en el modelo de la sinuosidad.

Tabla 19. Stepwise para el modelo lineal de la sinuosidad

Términos candidatos: NPCA. PAPCA. DCA. TDC						
	-----Paso 1-----		-----Paso 2-----		-----Paso 3-----	
	Coef	P	Coef	P	Coef	P
Constante	1,6258		1,6400		1,6123	
TDC	-0,003965	0,010	-0,004412	0,005	-0,004905	0,006
NPCA			0,000088	0,079	0,000106	0,037
PAPCA					0,002543	0,122
S		0,0154221		0,0098075		0,0057593
R-cuad.		84,22%		95,21%		98,90%
R-cuad. (ajustado)		80,27%		92,02%		97,25%
R-cuad. (pred)		58,68%		40,26%		79,21%
Cp de Mallows		12,95		4,53		3,04
α a entrar = 0,15. α a retirar = 0,15						

7.2.2. Regresión lineal múltiple

El modelo seleccionado en la regresión stepwise, utiliza como variables dependientes la tasa de descenso de caudal (TDC), el promedio anual de los pulsos de caudal alto (PAPCA) y el número de pulsos de caudal alto (NPCA), validados a través de una regresión lineal múltiple, la ecuación del modelo planteado presenta la siguiente forma:

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 * TDC + \hat{\beta}_2 * PAPCA + \hat{\beta}_1 * NPCA + \varepsilon \quad (17)$$

En la Tabla 21, se indican los estadísticos para el modelo de regresión lineal múltiple estimado para la sinuosidad (Sm).

Tabla 20. Regresión lineal para la sinuosidad

<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Error Estándar</i>	<i>Estadístico T</i>	<i>Valor-P</i>
CONSTANTE	2,557	0,0629814	40,6029	0,0006
NPCA	0,0003	0,0000596432	5,00165	0,0377
PAPCA	0,0072	0,00280058	2,60467	0,1212
TDC	-0,0138	0,00110038	-12,5666	0,0063

Al evaluar los P- valor en las variables independientes, se identifica la variable PAPCA con un valor significativamente mayor que 0.05, indicando que no es estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95,0% o mayor. Por lo anterior, se elimina la variable independiente PAPCA y se propone un nuevo modelo estadístico:

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 * TDC + \hat{\beta}_2 * NPCA + \varepsilon \quad (18)$$

La eficiencia del nuevo modelo estadístico, se evalúa partiendo del principio de parsimonia, descartando a la variable NPCA y considerando un modelo de regresión lineal para la sinuosidad (Sm), con la tasa de descenso de caudal (TDC) como única variable independiente. El nuevo modelo simplificado para la sinuosidad, indica una desviación estándar (s) de 0.0434, un r^2 de 84.22% y un r^2 ajustado de 80.28%.

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 * TDC + \varepsilon \quad (19)$$

En la Tabla 22, se indican los estadísticos para el nuevo modelo de regresión lineal estimado para la sinuosidad (Sm).

Tabla 21. Regresión lineal para el modelo simplificado de la sinuosidad

<i>Término</i>	<i>Coef</i>	<i>EE del coef.</i>	<i>Valor T</i>	<i>Valor p</i>	<i>VIF</i>
Constante	2,59	0,144	18,07	0,000	
TDC	-0,011	0,002	-4,62	0,010	1,00

7.2.3 Análisis de varianza

El modelo estadístico que mejor ajusta a los datos, es un modelo de regresión lineal que presenta la siguiente estructura:

$$S_m = 2,59 - 0,011 * TDC \quad (20)$$

El modelo de regresión lineal de la sinuosidad presenta una variable independiente significativa, tal como se observa en la Tabla 23.

Tabla 22. Análisis de varianza para la sinuosidad

<i>Fuente</i>	<i>GL</i>	<i>SC Ajust.</i>	<i>MC Ajust.</i>	<i>Valor F</i>	<i>Valor p</i>
Regresión	1	0,040253	0,040253	21,35	0,010
TDC	1	0,040253	0,040253	21,35	0,010
Error	4	0,007541	0,001885		
Total	5	0,047794			

7.2.4 Análisis de residuos

Los residuos no presentan tendencias, ni curvas en la gráfica y la dispersión vertical de los datos no varía mucho con la horizontal, tal como se observa en la Figura 57.

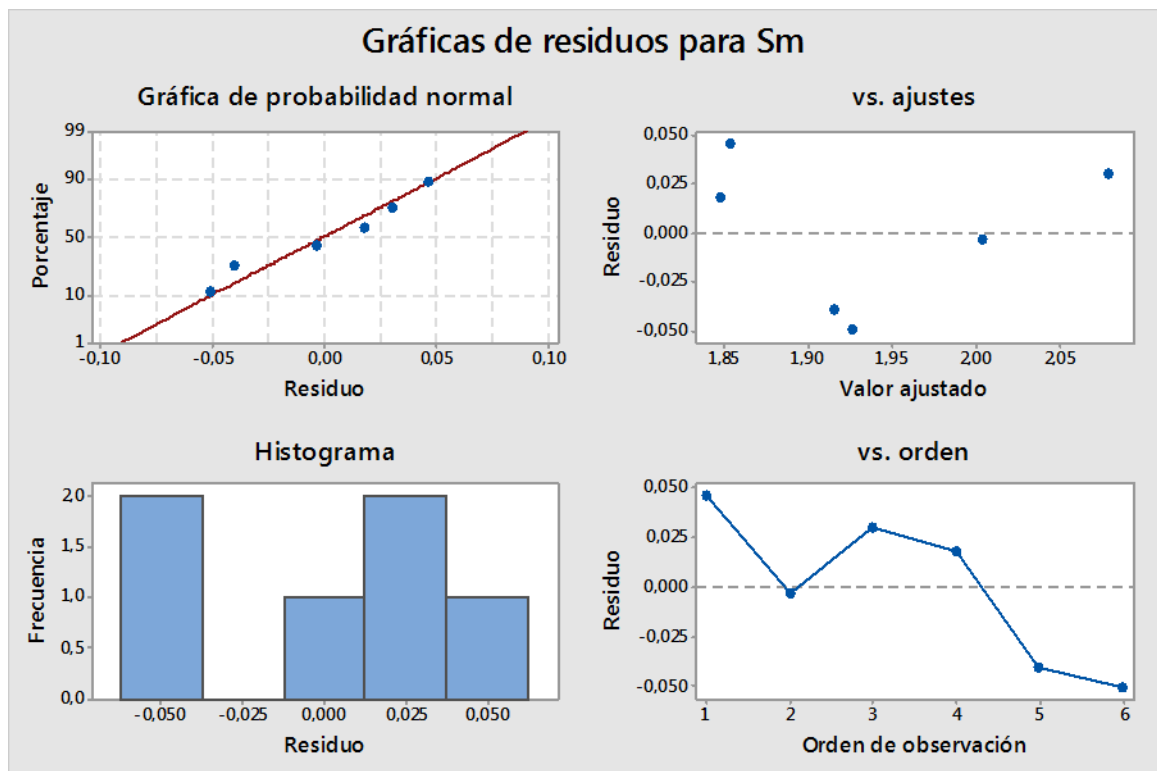


Figura 57. Análisis de residuos para el modelo lineal de la sinuosidad

7.2.5. Tasas de variación

La Tabla 24, indican las tasa de variación de los resultados teóricos y los estimados a través del modelo lineal para la Sinuosidad (Sm).

Tabla 23. Tasas de variación para el modelo lineal de la sinuosidad

TDC	Sm- TEORICO	Sm- ESTADISTICO	TASAS DE VARIACION	
			%M TEORICO	% M ESTIMADO
66,55	1,9000	1,854		
53,14	2,0000	2,003	5,00	7,48
46,33	2,1100	2,079	5,21	3,66
67,125	1,8654	1,847	-13,11	-12,57
61	1,8759	1,916	0,56	3,57
60	1,8764	1,927	0,03	0,58
			U de Theil	0,140

El indicador U de Theil registra un valor de 0.140, lo que indica un 14% en la desigualdad del valor observado sobre la predicción. En la Figura 58, se observa el diagrama de Theil para el modelo de regresión lineal múltiple de la sinuosidad.

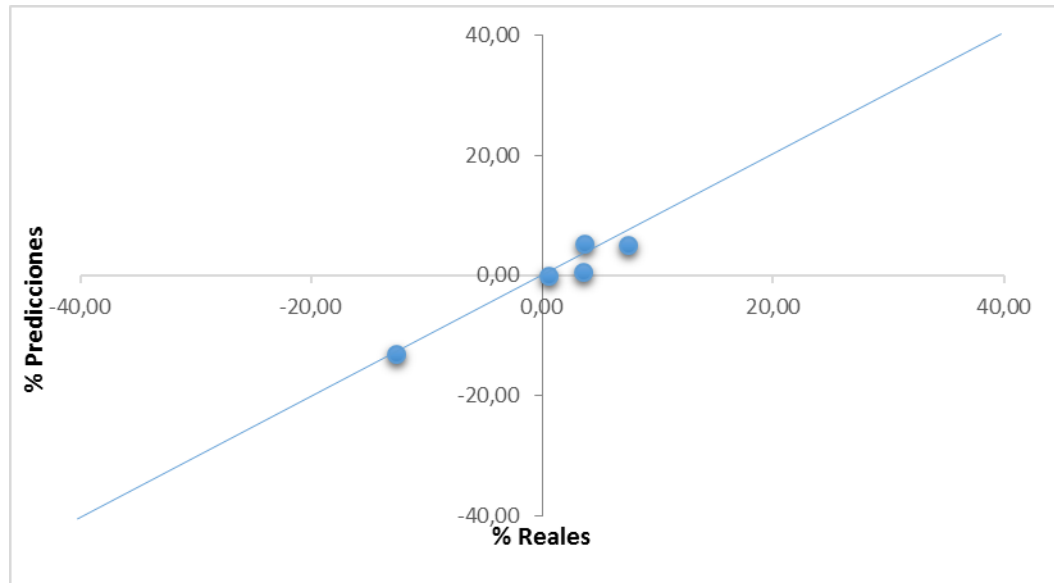


Figura 58. Diagrama de theil para el modelo lineal de la sinuosidad

7.2.6. Intervalos de predicción.

Los intervalos de predicción con un 90% de confianza, se establecen para el modelo de regresión lineal estimado para la Sinuosidad (S_m), tal como se indica en la Figura 59.

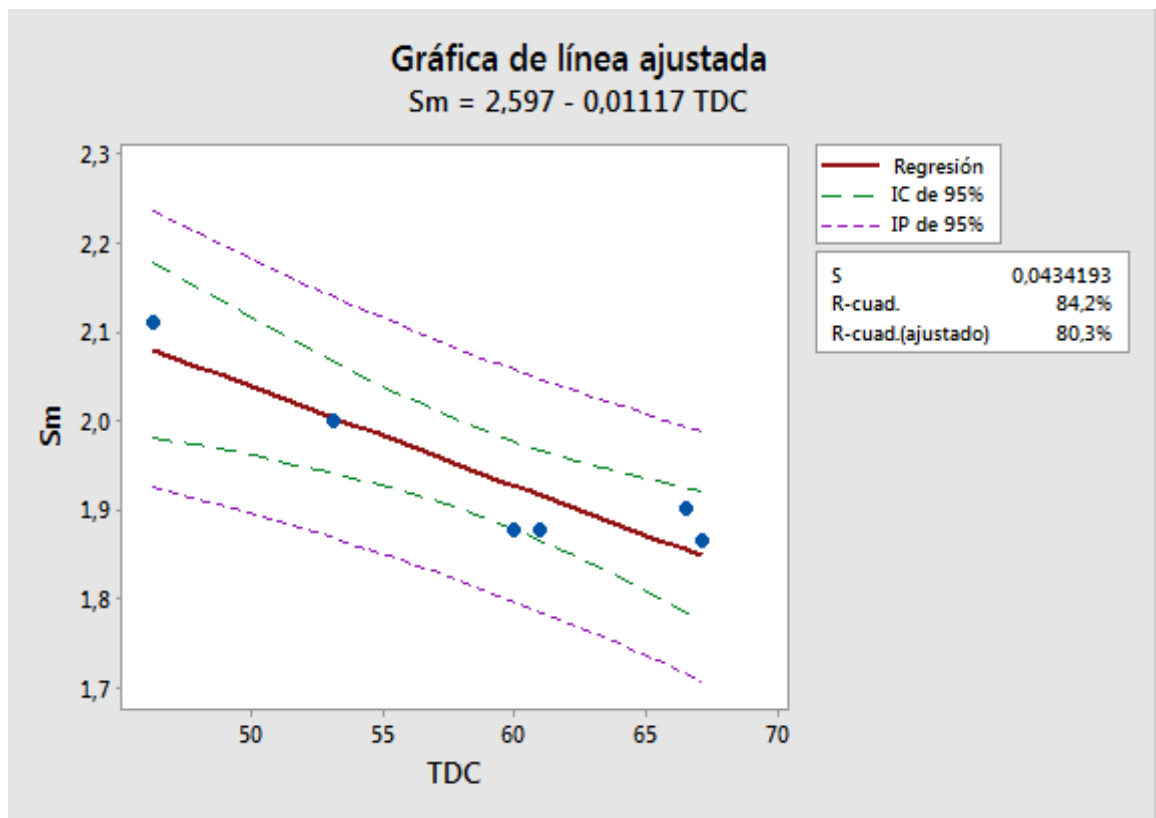


Figura 59. Intervalos de predicción para el modelo lineal de la sinusidad

7.3. Modelo lineal para la inferencia de la distancia relativa.

La hipótesis del modelo estadístico planteado indica que la diferencia de la distancia relativa (DDR), depende de variables hidrológicas, tales como la cantidad de pulsos altos de caudal, el promedio de pulsos altos generados anualmente, el tiempo que permanecen los caudales extremadamente altos, así como también, las tasas de descenso de los caudales.

7.3.1. Selección del modelo

Las variables independientes de la diferencia de la distancia relativa (DDR), son determinadas a través de la selección de mejores subconjuntos y la regresión paso a paso (stepwise).

El procedimiento selección de mejores subconjuntos, está diseñado para ayudar a seleccionar las variables independientes a usar al construir un modelo de regresión múltiple para predecir la variable cuantitativa dependiente diferencia de la distancia relativa (DDR)

Para el análisis de los mejores subconjuntos las variables independientes se denotaran con las siguientes constantes: A=Número de pulsos altos de caudal, B=Promedio anual de pulsos de caudal altos, C=Duración de caudales altos y D=Tasa de descenso de caudal. Se evalúan 6 casos completos y 16 modelos ajustados. Tal como se indica en la Tabla 25, los modelos con mejor comportamiento son ABD y ACD.

Tabla 24. Selección de mejores subconjuntos para la DDR

<i>CME</i>	<i>R-Cuadrada</i>	<i>R-Cuadrada Ajustada</i>	<i>Cp</i>	<i>Variables Incluidas</i>
104087,	0,0	0,0	156,8	
99932,4	23,19	3,99	121,5	A
104087,	20,0	0,0	145,8	B
100501,	22,75	3,44	122,2	C
76405,1	41,27	26,59	92,42	D
104087,	40,0	0,0	116,7	AB
104087,	40,0	0,0	112,9	AC
15701,4	90,94	84,91	14,55	AD
104087,	40,0	0,0	124,2	BC
101810,	41,31	2,18	94,36	BD
69343,4	60,02	33,3	64,27	CD
104087,	60,0	0,0	114,3	ABC
9635,55	96,29	90,74	7,954	ABD
23473,3	90,97	77,44	16,50	ACD
77627,0	70,16	25,42	49,96	BCD
3236,53	99,37	96,89	5,0	ABCD

El modelo seleccionado en la regresión stepwise, contiene tres (3) variables independientes (Número de pulsos altos de caudal, Promedio anual de pulsos de caudal altos, Tasa de descenso de caudal), un p-valor menor de 0.05, un estadístico bondad de ajuste (r^2) de 97% y un Cp de mallows de 3. La Tabla 26, indica la regresión stepwise aplicada en el modelo para la diferencia de la distancia relativa (DDR).

Tabla 25. Stepwise para el modelo lineal de la DDR

Términos candidatos: NPCA. PAPCA. DCA. TDC						
	-----Paso 1-----		-----Paso 2-----		-----Paso 3-----	
	Coef	P	Coef	P	Coef	P
Constante	1,6258		1,6400		1,6123	
TDC	-0,003965	0,010	-0,004412	0,005	-0,004905	0,006
NPCA			0,000088	0,079	0,000106	0,037
PAPCA					0,002543	0,122
S		0,0154221		0,0098075		0,0057593
R-cuad.		84,22%		95,21%		98,90%
R-cuad. (ajustado)		80,27%		92,02%		97,25%
R-cuad. (pred)		58,68%		40,26%		79,21%
Cp de Mallows		12,95		4,53		3,04
α a entrar = 0,15. α a retirar = 0,15						

7.3.2 Regresión lineal múltiple

El modelo seleccionado en la regresión stepwise, utiliza como variables dependientes la tasa de descenso de caudal (TDC), el promedio anual de los pulsos de caudal alto (PAPCA) y el número de pulsos de caudal alto (NPCA), validados a través de una regresión lineal múltiple, la ecuación del modelo planteado presenta la siguiente forma:

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 * TDC + \hat{\beta}_2 * PAPCA + \hat{\beta}_1 * NPCA + \varepsilon \quad (21)$$

En la Tabla 27, se indican los estadísticos para el modelo de regresión lineal múltiple estimado para la diferencia de la distancia relativa (DDR).

Tabla 26. Regresión para el modelo lineal de la DDR

<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Error Estándar</i>	<i>Estadístico T</i>	<i>Valor-P</i>
CONSTANTE	1846,92	376,56	4,904	0,0391
NPCA	1,94	0,356	5,449	0,0321
PAPCA	28,45	16,744	1,699	0,2313
TDC	-40,13	6,579	-6,100	0,0258

Al evaluar los P- valor en las variables independientes, se identifica la variable PAPCA con un valor significativamente mayor que 0.05, indicando que no es estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95,0% o mayor. Por lo anterior, se elimina la variable independiente PAPCA y se propone un nuevo modelo estadístico:

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 * TDC + \hat{\beta}_2 * NPCA + \varepsilon \quad (21)$$

En la Tabla 28, se indican los estadísticos para el nuevo modelo de regresión lineal múltiple estimado para la diferencia de la distancia relativa (DDR).

Tabla 27. Regresión lineal para el nuevo modelo lineal de la DDR

<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Error Estándar</i>	<i>Estadístico T</i>	<i>Valor-P</i>
CONSTANTE	2157,03	420,503	5,129	0,0143
NPCA	1,74	0,428	4,057	0,0270
TDC	-34,61	7,304	-4,739	0,0178

El modelo de regresión múltiple para la diferencia de la distancia relativa (DDR) presenta una desviación estándar (s) de 125,305, con un r^2 de 90,95% y un r^2 ajustado de 84,92%.

7.3.3. Análisis de varianza

El modelo estocástico que mejor ajusta a los datos, es un modelo de carácter empírico que presenta la siguiente estructura:

$$\text{DDR} = 2157,03 + 1,74 * \text{NPCA} - 34,61 * \text{TDC} \quad (22)$$

Los resultados de análisis de varianza indican que para el modelo de regresión múltiple estimado para la diferencia de la distancia relativa (DDR) las dos variables independientes analizadas son significativas, tal como se observa en la Tabla 29.

Tabla 28. Análisis de varianza para el modelo lineal de la DDR

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadros</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	473331,	2	236665,	15,07	0,0272
Residuo	47104,1	3	15701,4		
Total (Corr.)	520435,	5			

7.3.4 Análisis de residuos

Los residuos no presentan tendencias, ni curvas en la gráfica y la dispersión vertical de los datos no varía mucho con la horizontal, tal como se observa en la Figura 60.

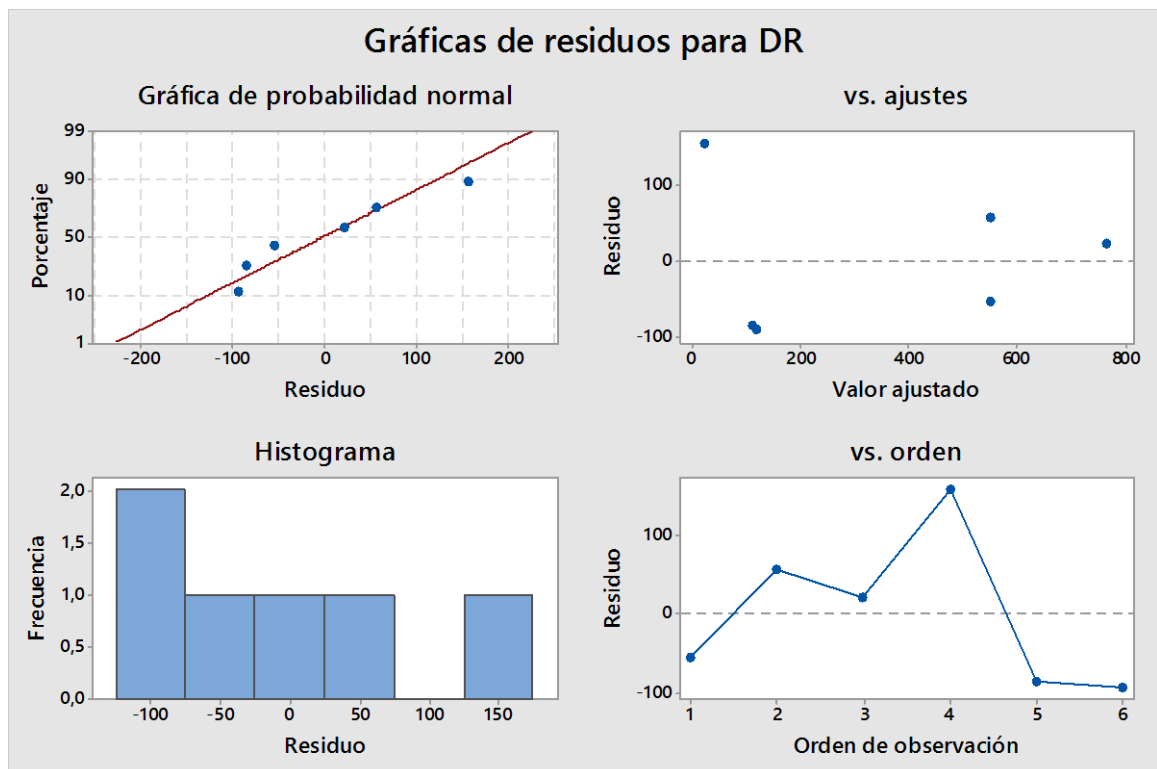


Figura 60. Análisis de residuos para el modelo lineal de la DDR

7.3.5 Tasas de variación

La Tabla 30, indican las tasa de variación de los resultados teóricos y los estimados a través del modelo empírico para la diferencia de la distancia relativa (DDR).

Tabla 29. Tasas de variación para el modelo lineal de la DDR

NPCA	TDC	DDR	DDR- ESTADIS- TICO	TASAS DE VARIACION	
				%M TEORICO	% M ESTIMADO
401	66,55	496	550,890		
135	53,14	608,685	552,358	-22,60	-0,27
123	46,33	778,102	767,221	-27,83	-38,90
108,5	67,125	178,527	22,146	77,06	97,11
38	61	25,673	111,529	85,62	-403,60
22	60	25	118,312	2,62	-6,08
				U de Theil	0,912

El indicador U de Theil registra un valor de 0.912, lo que indica un 91.2% en la desigualdad del valor observado sobre la predicción, un valor muy alto que se encuentra relacionado con una alta desviación estándar. En la Figura 61, se observa el diagrama de Theil para el modelo de regresión lineal múltiple estimada para la diferencia de la distancia relativa (DDR).

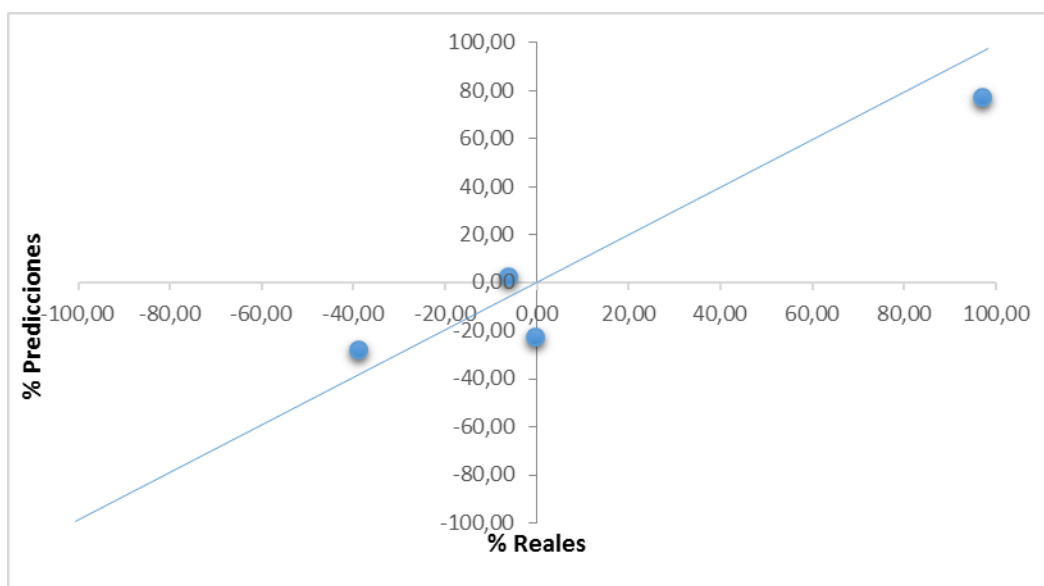


Figura 61. Diagrama de theil para el modelo lineal de la DDR

7.3.6. Intervalos de predicción.

Los intervalos de predicción con un 90% de confianza, se establecen para el modelo de regresión lineal múltiple estimada para la diferencia de la distancia relativa (DDR), tal como se indica en la Figura 62.

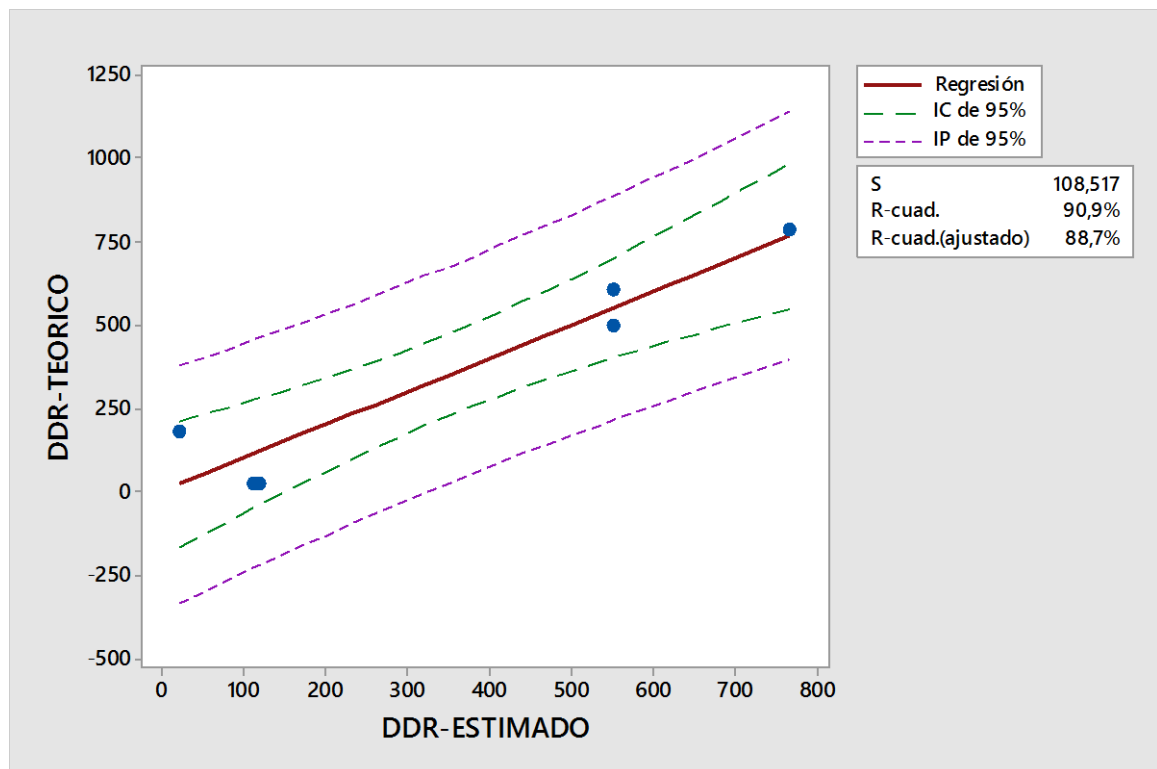


Figura 62. Intervalos de predicción para el modelo lineal de la DDR

7.4. Modelo no lineal para el factor de migración lateral

Se analizaron tres modelos no lineales para el factor de migración lateral con diferentes comportamientos exponencial, potencial y logístico. (Ver anexo 7)

Sin embargo, el modelo no lineal de mejor ajuste a los datos presenta un comportamiento logístico, tal como se observa en la Figura 63.

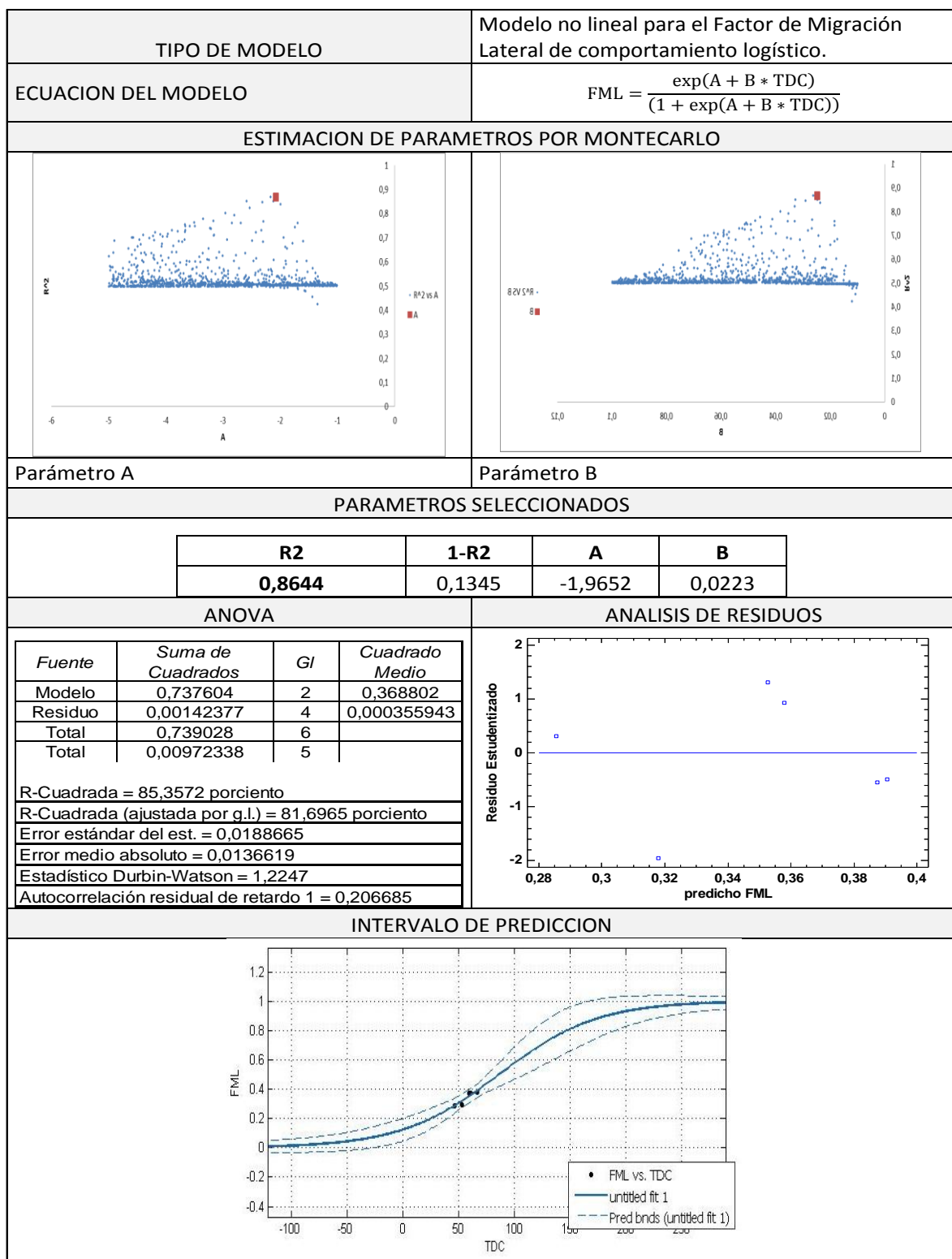


Figura 63. Modelo no lineal para el factor de migración lateral con comportamiento logístico

7.5. Modelo no lineal para la sinuosidad

Se analizaron tres modelos no lineales para la sinuosidad con diferentes comportamientos exponencial y potencial, (Ver anexo 7).

Sin embargo, el modelo no lineal de mejor ajuste a los presenta un comportamiento potencial, tal como se observa en la Figura 65 y en la Figura 66.

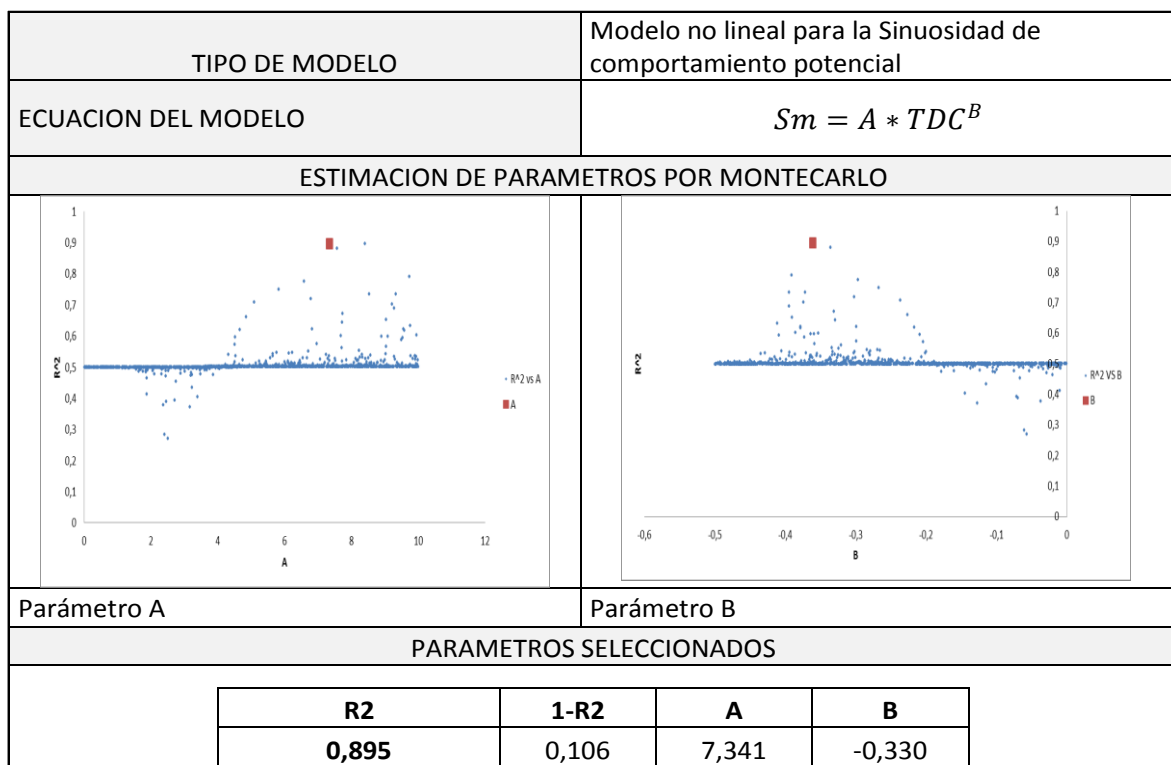


Figura 64. Modelo no lineal de la sinuosidad con comportamiento potencial

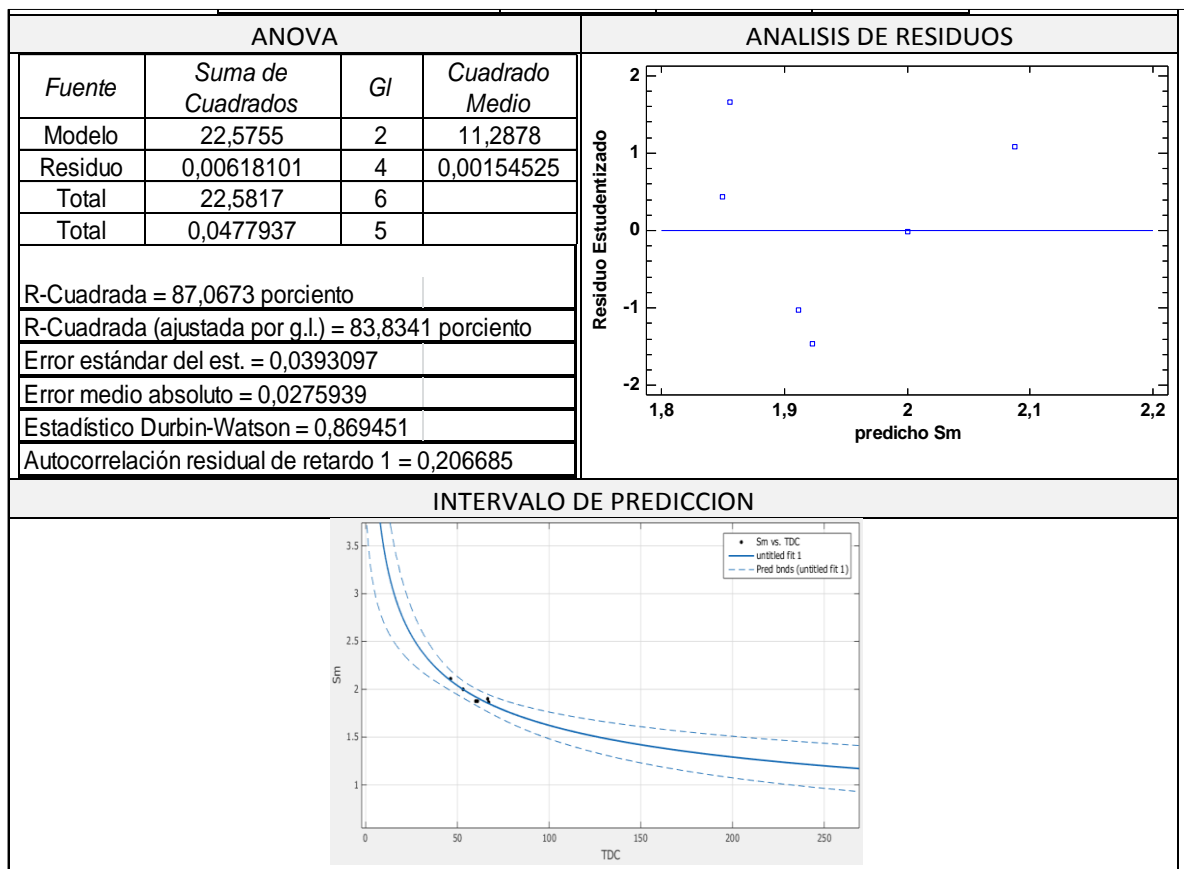


Figura 65. Parámetros estadísticos del modelo no lineal para la sinusidad

7.6. Modelo no lineal para la diferencia en la distancia relativa

Se analizaron tres modelos no lineales para la diferencia en la distancia relativa, con comportamiento gaussiano y se analizó el modelo, a partir de la función de Fourier, (Ver anexo 7).

El modelo no lineal de mejor ajuste a los datos, presenta un comportamiento armónico formado por sinusoides y cosinusoides (serie de Fourier), tal como se observa en la Figura 67 y en la Figura 68. Sin embargo, estos modelos presentan un amplio rango en los intervalos de predicción, lo que genera incertidumbre sobre la predicción.

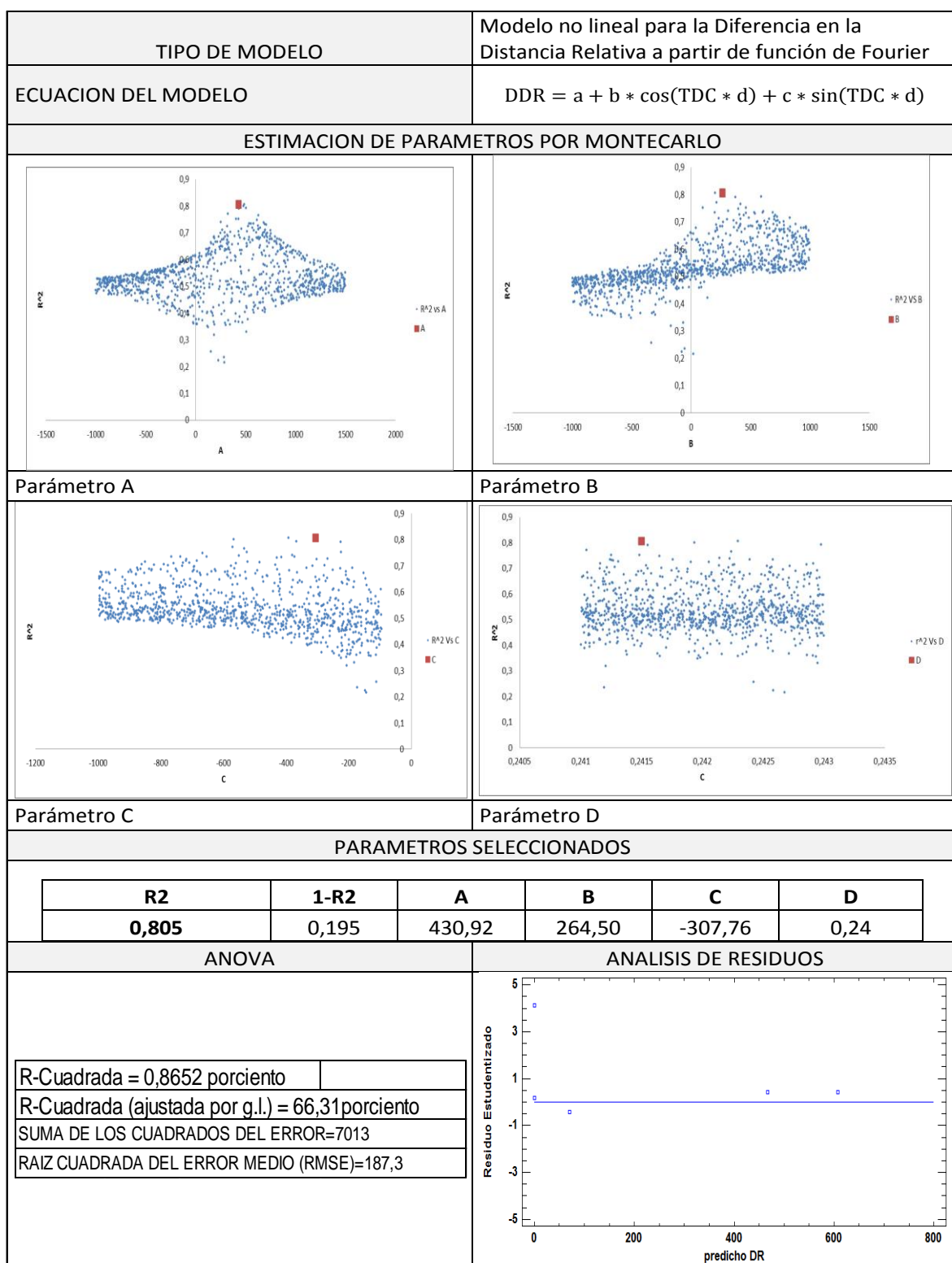


Figura 66. Modelo no lineal para la diferencia en la distancia relativa entre dos cauces

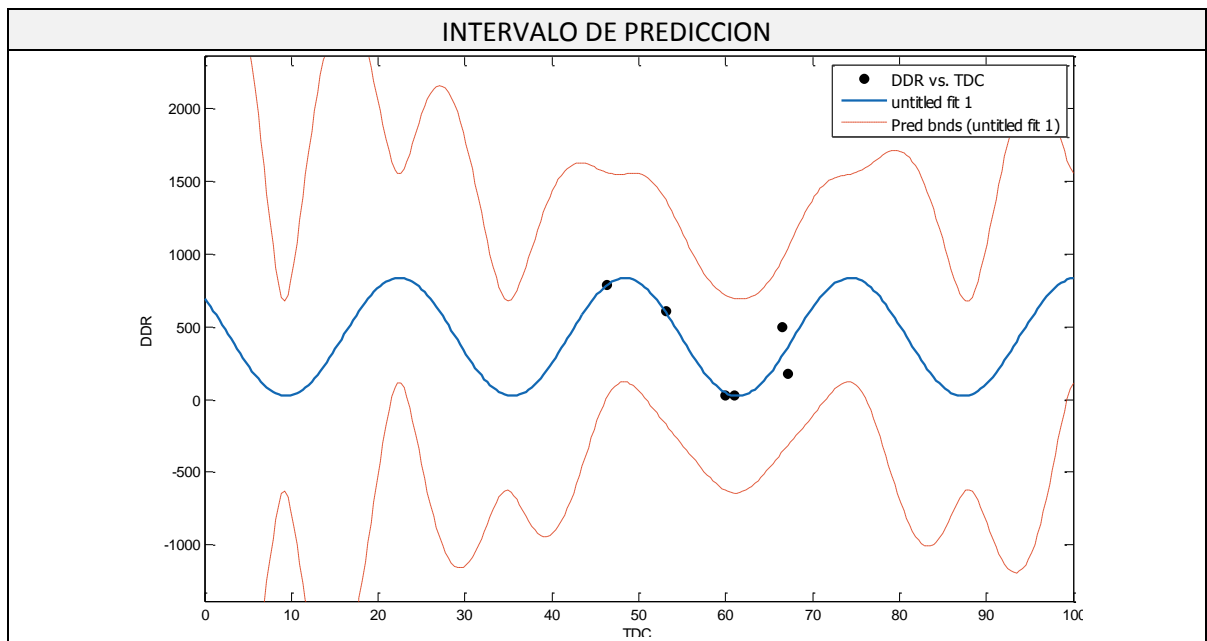


Figura 67. Intervalo de predicción del modelo no lineal para la diferencia en la distancia relativa.

7.7. Selección del modelo

Un modelo que contiene todos los parámetros puede ajustar perfectamente la muestra, pero por lo general, presenta baja capacidad de generalización. El objetivo en la selección del modelo estadístico óptimo, es obtener el mejor ajuste con los mínimos parámetros requeridos, apelando al principio de parsimonia (Navaja de Ockham) "Construir explicaciones de la realidad que hacen uso del mínimo número de entidades".

Distintos métodos para la selección de modelos han sido propuestos en la literatura, sin que exista un criterio unánime sobre cuál es la mejor forma de seleccionar un modelo óptimo. Sin embargo, existen algunas propiedades deseables que todo modelo óptimo debe satisfacer; esto es, estabilidad del modelo, una tendencia fija y residuos ajustados con distribución homocedastica.

En la Tabla 31, se esgrimen los modelos estadísticos seleccionados que cumplen los principios descritos con anterioridad. Los modelos estadísticos para la Sinuosidad, la Diferencia en la distancia relativa y el Factor de migración lateral, se describen a continuación:

Tabla 30. Modelos estadísticos seleccionados.

Factor de migración lateral.	Modelo lineal	$FML = 0,2137 - 0,004685 * PAPCA - 0,03842 * DCA + 0,005632 * TDC$
	Modelo no lineal tipo empírico	$FML = \left(\frac{EXP(-1,96837 + 0,0226879 * TDC)}{1 + EXP(-1,96837 + 0,0226879 * TDC)} \right)$
Sinuosidad.	Modelo lineal	$Sm = 2,597 - 0,01117 * TDC$
	Modelo no lineal tipo potencial	$Sm = 7.4 * TDC^{-0.33}$
Diferencia en la distancia relativa	Modelo lineal	$DDR = 2157,03 + 1,73962 * NPCA - 34,6165 * TDC$
	Modelo no lineal tipo empírico	$DDR = 431 + 264.5 * \cos(TDC * 0.242) - 307.6 * \sin(TDC * 0.242)$

8. VALIDACIÓN DE LOS MODELOS ESTADÍSTICOS SELECCIONADOS

Se realiza a partir de la caracterización hidrológica y morfológica del río Sinú para el periodo 2006-2013, y permite comprobar si los resultados arrojados por el modelo difieren de la realidad, o al menos, se encuentran ubicados dentro de los intervalos de predicción.

8.1. Indicadores de cambio hidrológico para el río Sinú (2006-2013).

Los flujos de caudal medio y bajos, según el registro hidrológico de caudales presentan una condición dominante, con una media de 348 m³/s. Las fluctuaciones en los pulsos de caudal van desde los 1300m³/s a 100 m³/s, tal como se observa en la Figura 68.

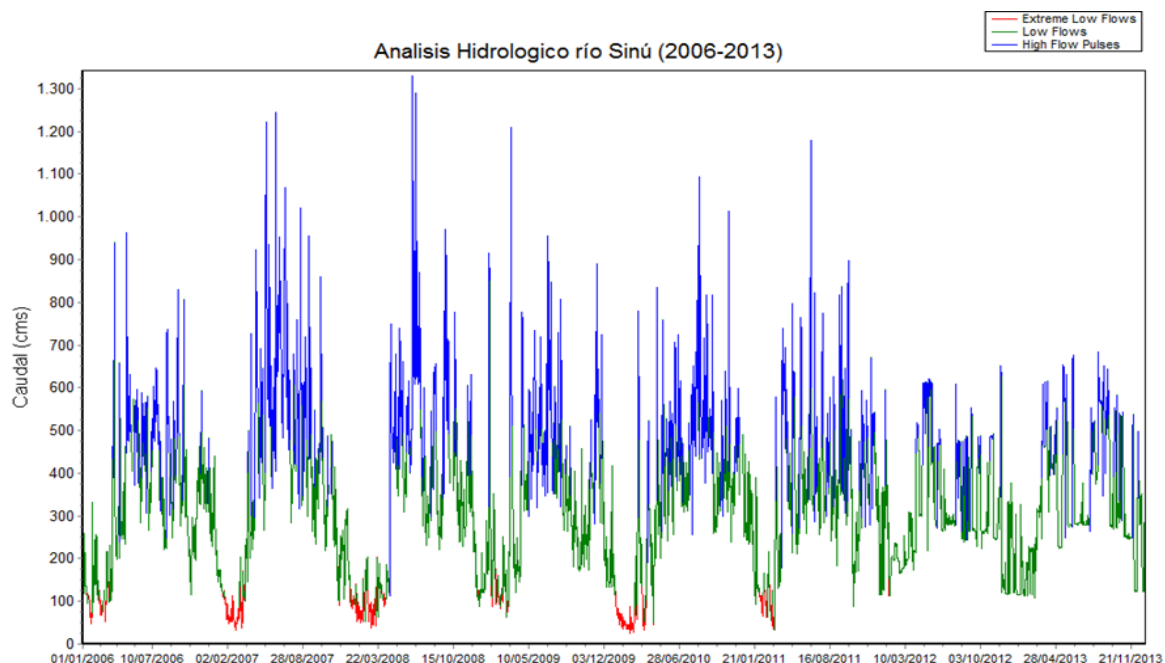


Figura 68. Comportamiento hidrológico río Sinú (2006-2013).

8.1.1. Pulsos de caudal altos para el río Sinú (2006-2013).

El análisis hidrológico indica que el río Sinú experimenta pocas crecientes súbitas de caudal. En la Figura 69, se observa el comportamiento de los pulsos de caudal alto, el cual registro un total de 165 pulsos para el periodo (2006-2013), con un promedio anual de 20 pulsos de caudal alto.

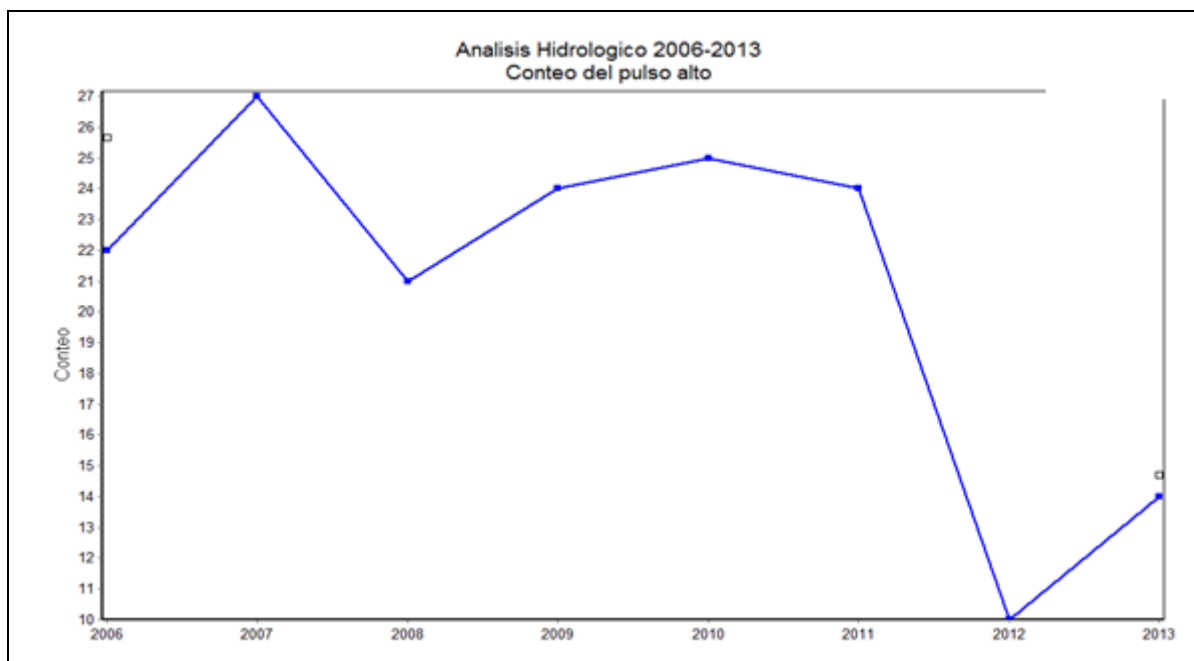


Figura 69. Conteo de pulsos altos de caudal para el río Sinú (2006-2013).

Los registros hidrológicos indican una tendencia estable en la duración de los pulsos de caudal alto, con un promedio de 2.41 días para el periodo hidrológico evaluado, tal como se observa en la Figura 70.

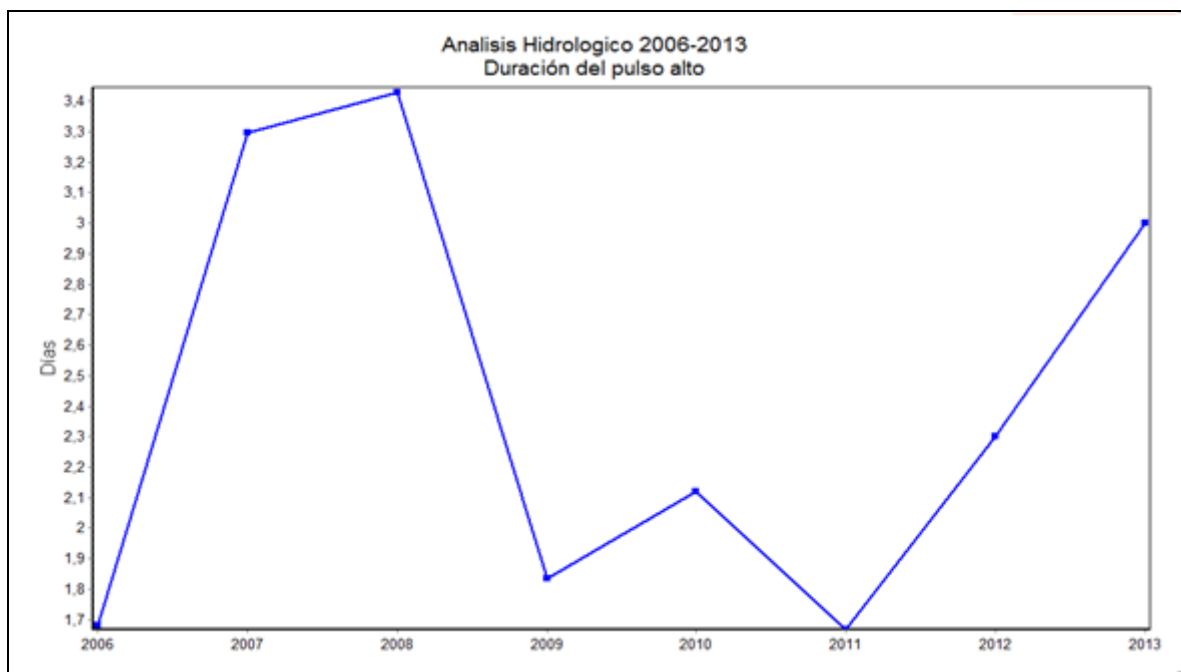


Figura 70. Duración de los pulsos altos de caudal para el río Sinú (2006-2013).

8.1.2. Tasas de variación de caudal (2006-2013)

La variabilidad en el régimen de caudales para el río Sinú se determina por medio de las tasas de ascenso y descenso de caudal. En la Figura 71, se observan las tasas de ascenso de caudal con valores anuales que oscilan entre los 104 y 52 m³/s al día, la media anual para el periodo hidrológico (2006-2013) es de 84.75 m³/s al día.

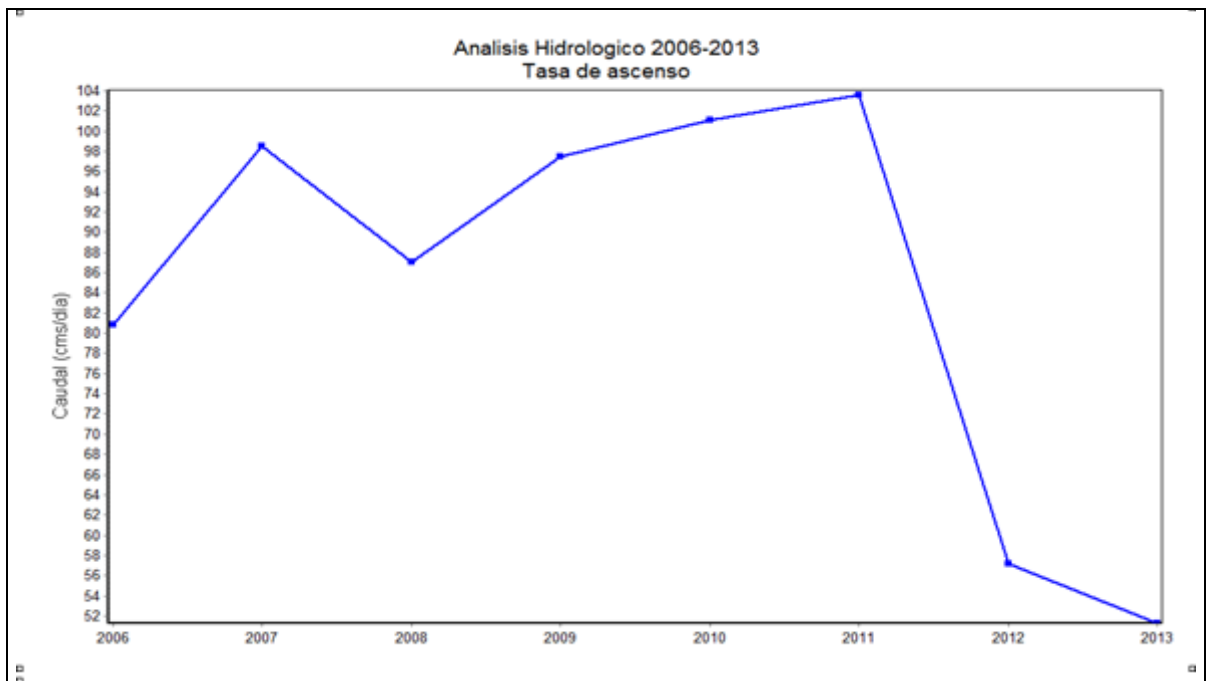


Figura 71. Tasas de ascenso para el caudal del río Sinú (2006-2013).

Un comportamiento similar, registran las tasas de descenso con valores de promedio anual en 67.5 m³/s al día, tal como se observa en la Figura 72.

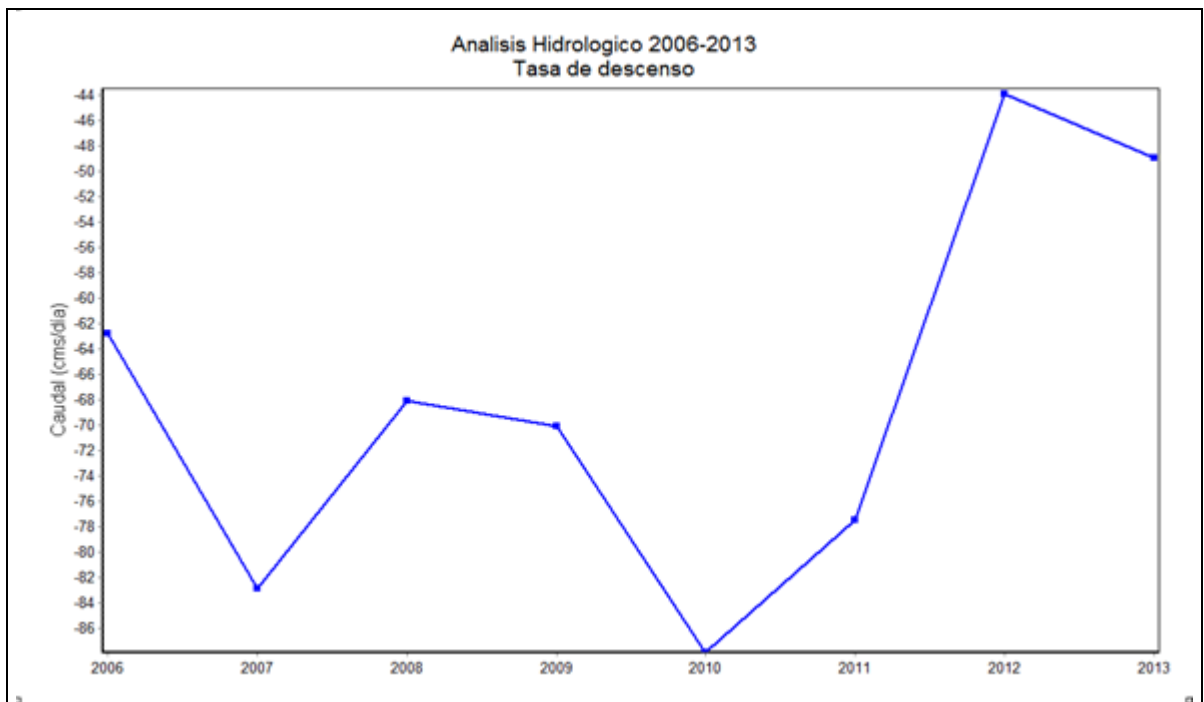


Figura 72. Tasas de descenso para el caudal del río Sinú (2006-2013).

8.2. Indicadores de cambio morfológico para el río Sinú (2006-2013)

Una caracterización geométrica actualizada del río Sinú, permite definir si las variaciones morfológicas presentes en el cauce, se encuentran dentro de los rangos e intervalos de predicción, definidos en los modelos estadísticos de los indicadores de cambio morfológico, tales como: el factor de migración lateral, la sinuosidad y la diferencia en la distancia relativa entre cauces.

8.2.1. Caracterización geométrica del cauce.

Las variables morfológicas son deducidas con base en una imagen satelital actualizada tipo Landsat del año 2014 sobre el río Sinú, con el fin de caracterizar la forma en planta del meandro, tal como se indica en la Figura 73.

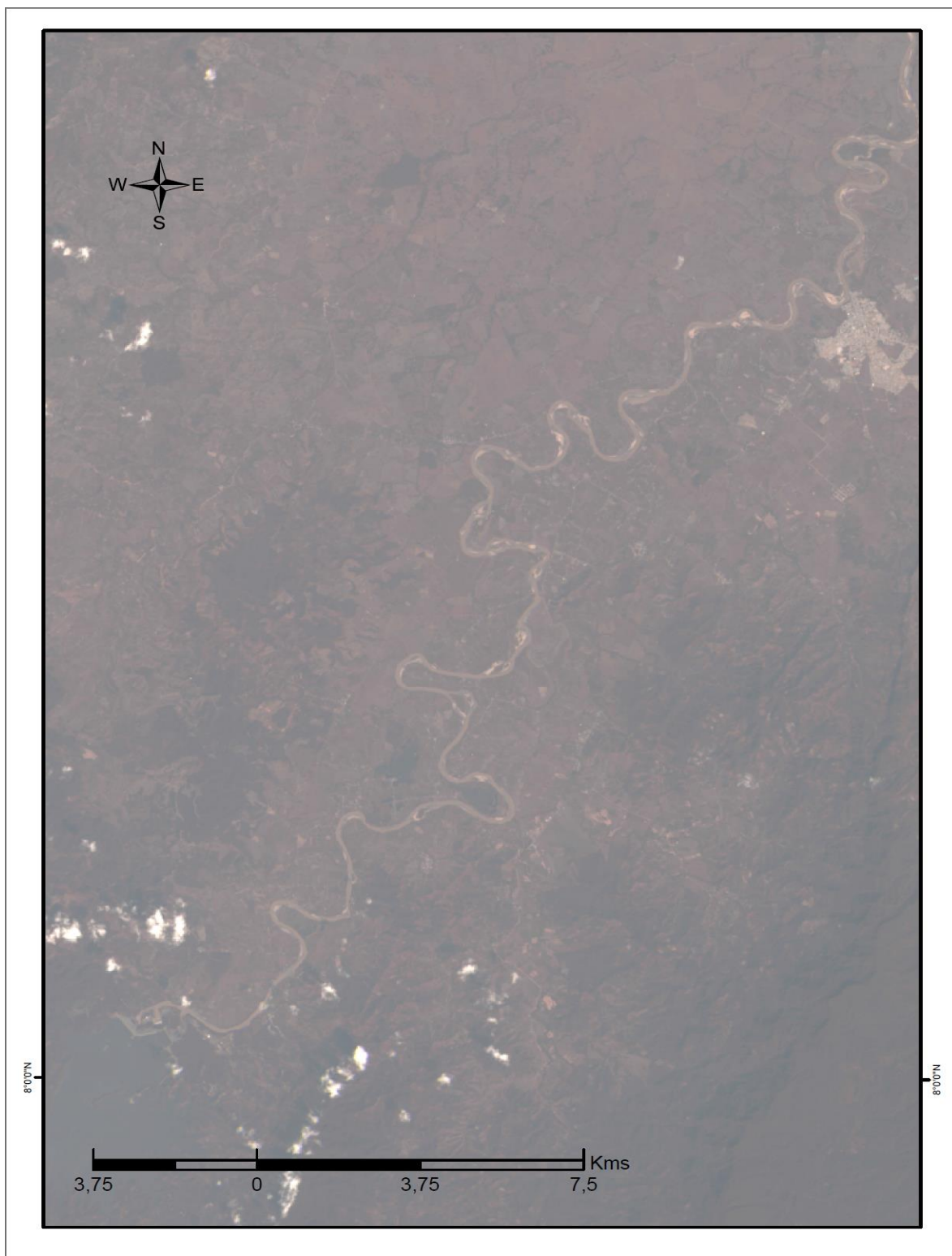


Figura 73. Imagen Landsat (2014) sobre el río Sinú

8.2.1.1. Ajuste de curvas del río Sinú 2014.

Se caracterizaron 18 curvaturas para el ajuste geométrico, tal como se observa en la Figura 74, los valores mínimos en los radios de curvatura (R_c) fueron de 419 m y valores máximos de 1318 m.

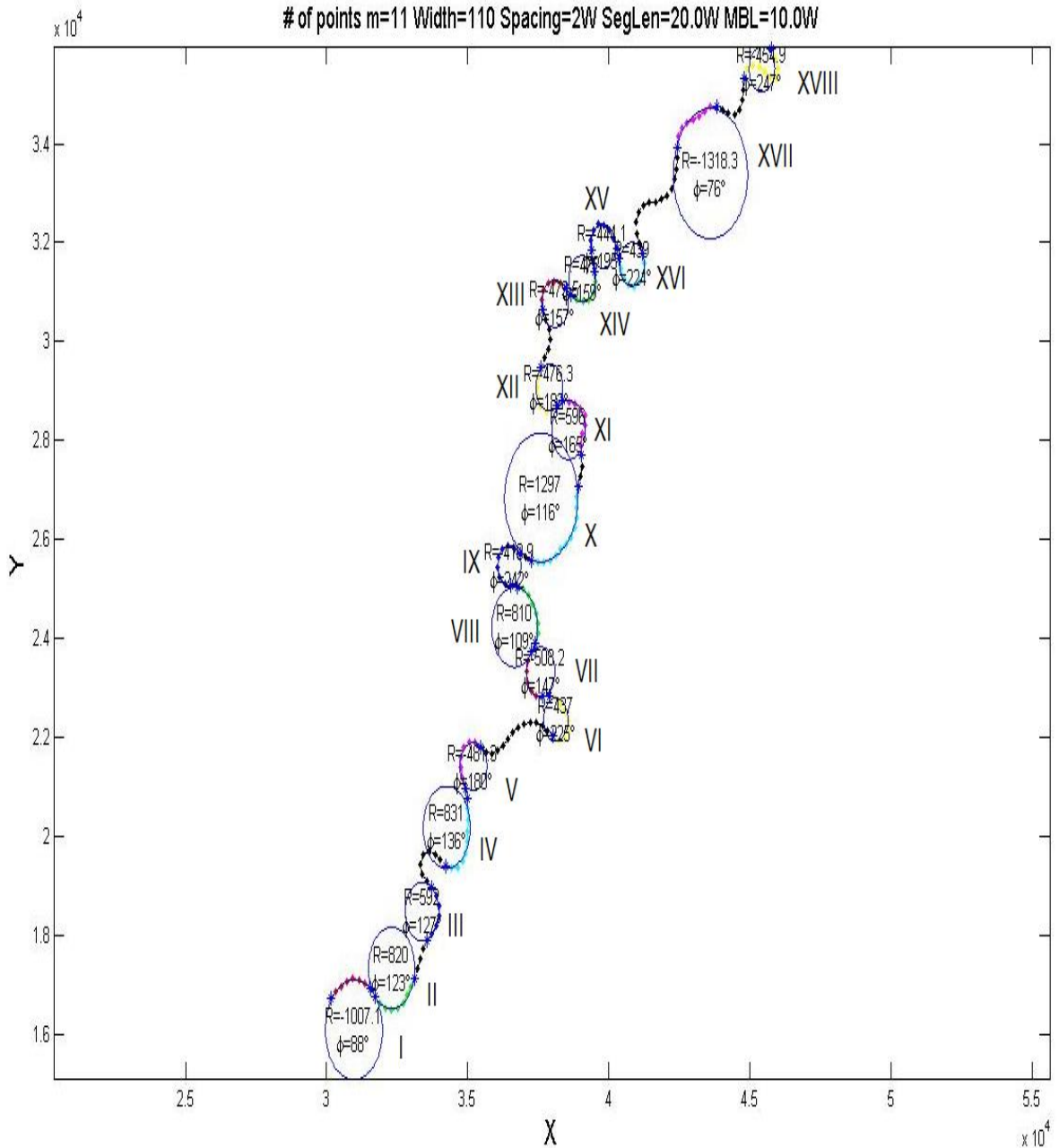


Figura 74. Caracterización geométrica mediante software Meander para el río Sinú (2014).

8.2.1.2. Relación radio de curvatura y ancho de canal para el río Sinú 2014.

La Figura 75, indica el comportamiento del radio de curvatura en relación con el ancho del río Sinú.

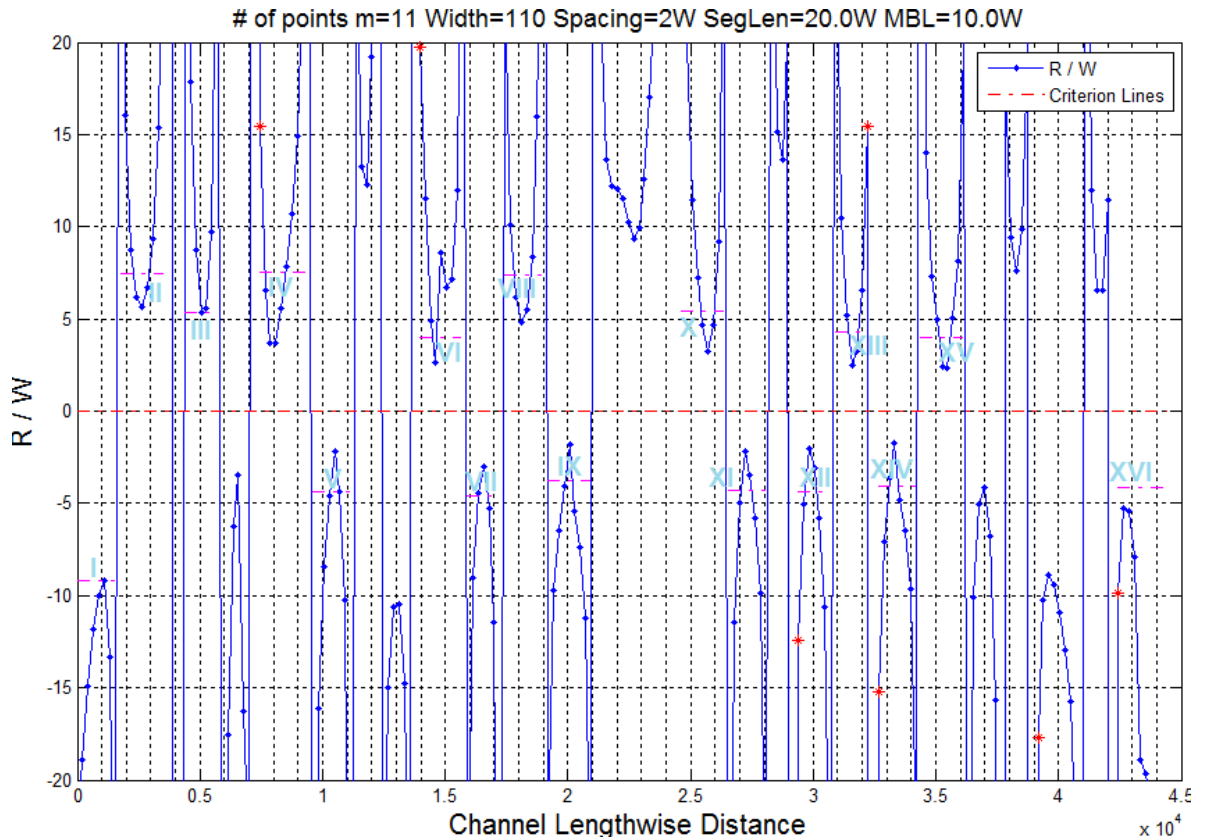


Figura 75. Relación radio de curvatura y ancho del canal para el río Sinú en el año 2014.

El promedio de la relación entre el radio de curvatura y el ancho del río Sinú para el año 2014 es de 5.14, tal como se indica en la Tabla 32.

Tabla 31. Valores de la relación R_c/W para las curvaturas del río Sinú en el año 2014.

Curva	R_c/W
I	9
II	7,5
III	5,45
IV	7,72
V	4,09
VI	4,09
VII	4,54
VIII	7,27
IX	3,63
X	5,45
XI	4,09
XII	4,09
XIII	4,09
XIV	3,63
XV	3,63
XVI	4,09

8.2.2. Factor de migración lateral

En la validación de los modelos de regresión lineal y no lineal para el factor de migración lateral, se verifica la fidelidad y precisión de los mismos.

8.2.2.1. Validación del modelo estadístico de regresión lineal

La relación radio de curvatura y ancho de canal es de 5.14, para el río Sinú en el año 2014. Por tanto, teórico es de 0.389 m/año. Por otro parte, el valor estimado del factor de migración lateral a partir del modelo de regresión lineal múltiple propuesto, es de 0.4075 m/año. La Figura 76, indica la validación del modelo estadístico propuesto.

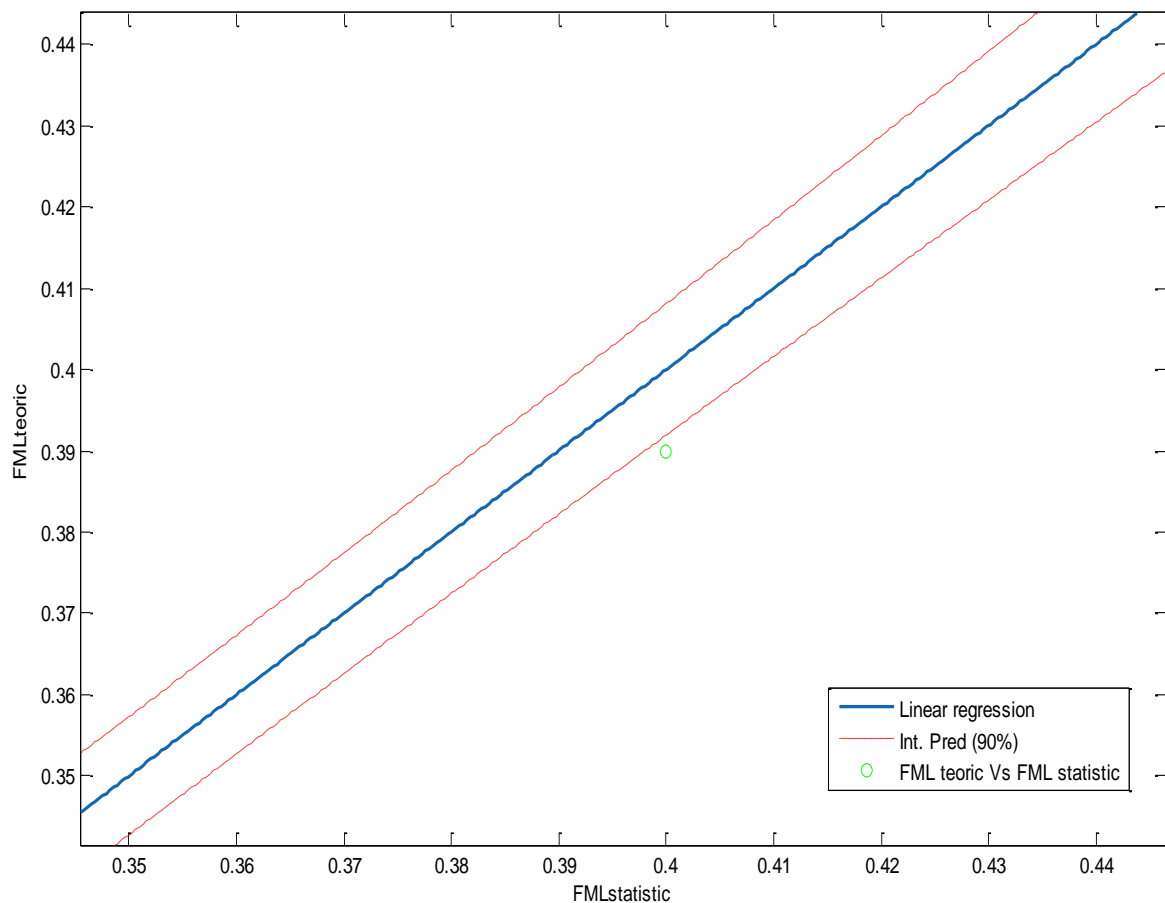


Figura 76. Validación del modelo de regresión lineal para el factor de migración lateral

8.2.2.2. Validación del modelo estadístico de regresión no lineal.

La relación radio de curvatura y ancho de canal para el río Sinú en el año 2014, permite inferir un factor de migración lateral de 0.389 m/año. Por otro lado, el estimado a partir del modelo estadístico propuesto es de 0.392 m/año, para una tasa de descenso de caudal de 67.5 m³/s al día. El factor de migración lateral teórico se encuentra dentro del intervalo de predicción del modelo estadístico, tal como se observa en la Figura 77.

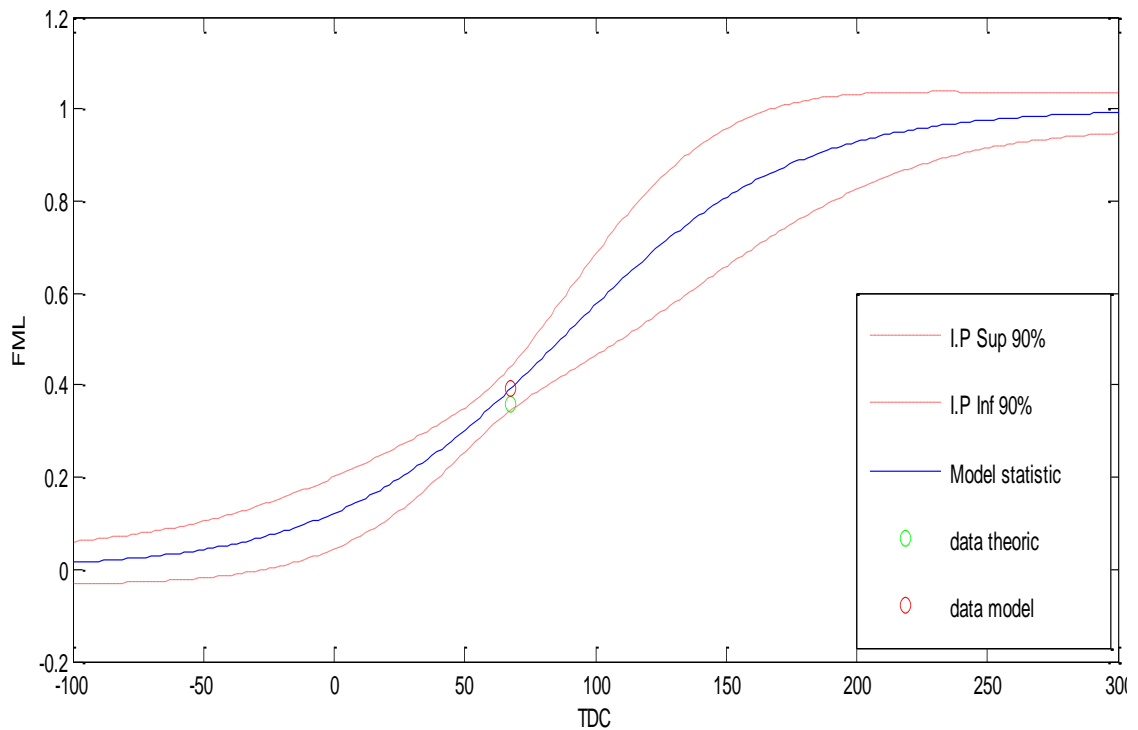


Figura 77. Validación del modelo de regresión no lineal para el Factor de migración lateral.

8.2.3. Sinuosidad

En la validación de los modelos de regresión lineal y no lineal para sinuosidad, se verifica la fidelidad y precisión de los mismos.

8.2.3.1. Validación del modelo estadístico de regresión lineal

El río Sinú en el tramo de estudio presenta para el año 2014, una sinuosidad estimada teóricamente de 1.93. Por otra parte, la sinuosidad estimada a partir del modelo estadístico de regresión lineal propuesto es de 1.843. En la Figura 78, se observa la validación del modelo de regresión lineal propuesto para la sinuosidad.

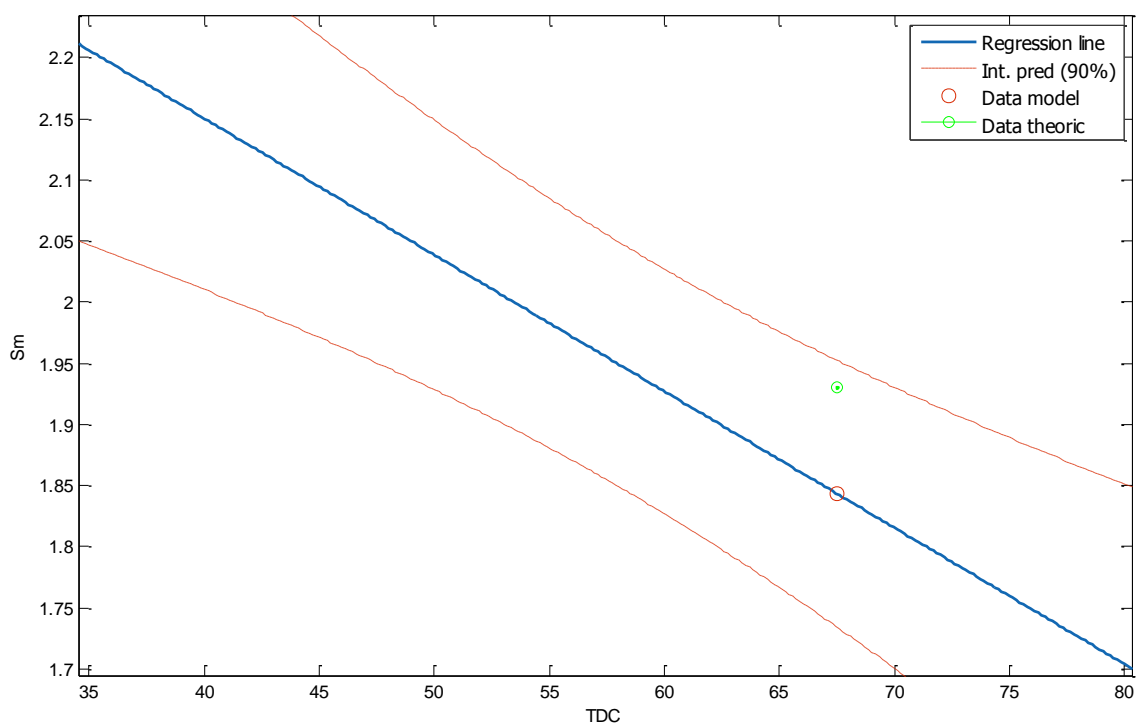


Figura 78. Validación del modelo de regresión lineal para la sinuosidad.

8.2.3.2. Validación del modelo estadístico de regresión no lineal

La sinuosidad en el río Sinú para el año 2014, estimada a partir del modelo estadístico propuesto es de 1.84, para una tasa de descenso de caudal de 67.5 m³/s al día. Sin embargo, el río Sinú en el tramo de estudio presenta una longitud del thalweg de 47848 m y una longitud de valle de 24742 m, por lo cual la sinuosidad estimada teóricamente en el río Sinú para el año 2014 es de 1.93, el cual se enmarca dentro del intervalo de predicción del modelo, tal como indica en la Figura 79.

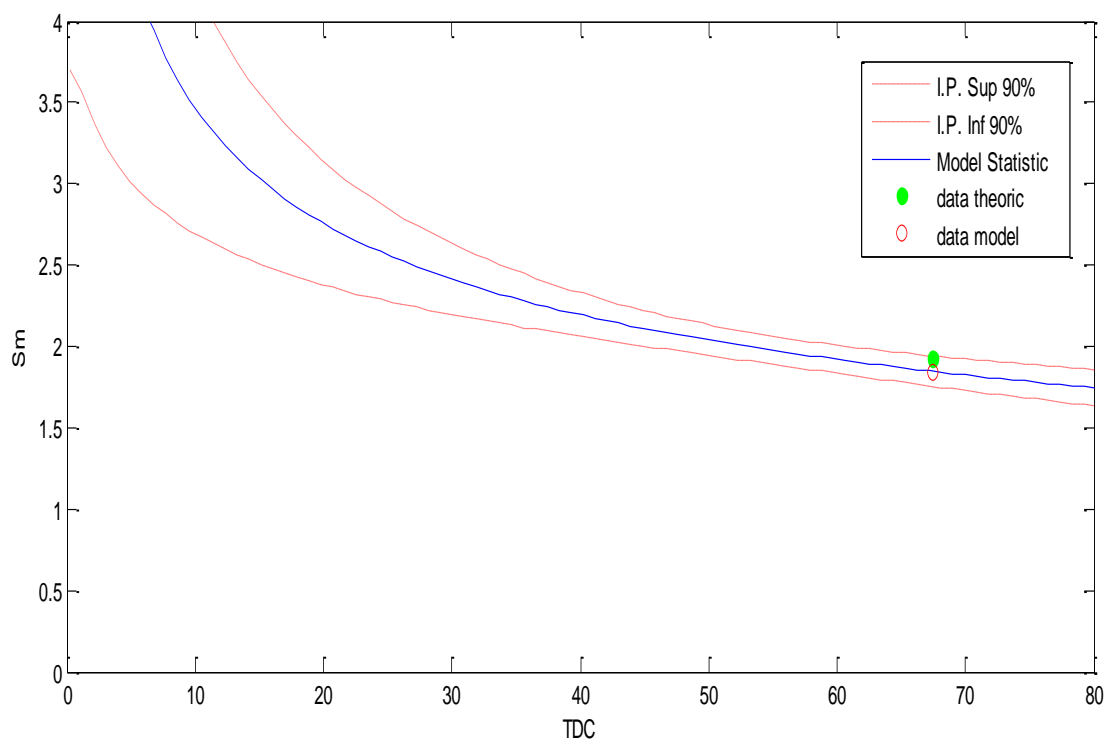


Figura 79. Validación del modelo de regresión no lineal para la Sinuosidad.

8.2.4. Diferencia en la distancia relativa

El análisis del indicador diferencia de la distancia relativa para el río Sinú, se realiza a partir de la superposición de las imágenes Lansat proyectadas sobre el tramo de estudio del río Sinú en el año 2005 y 2014, tal como se indica en la Figura 80.

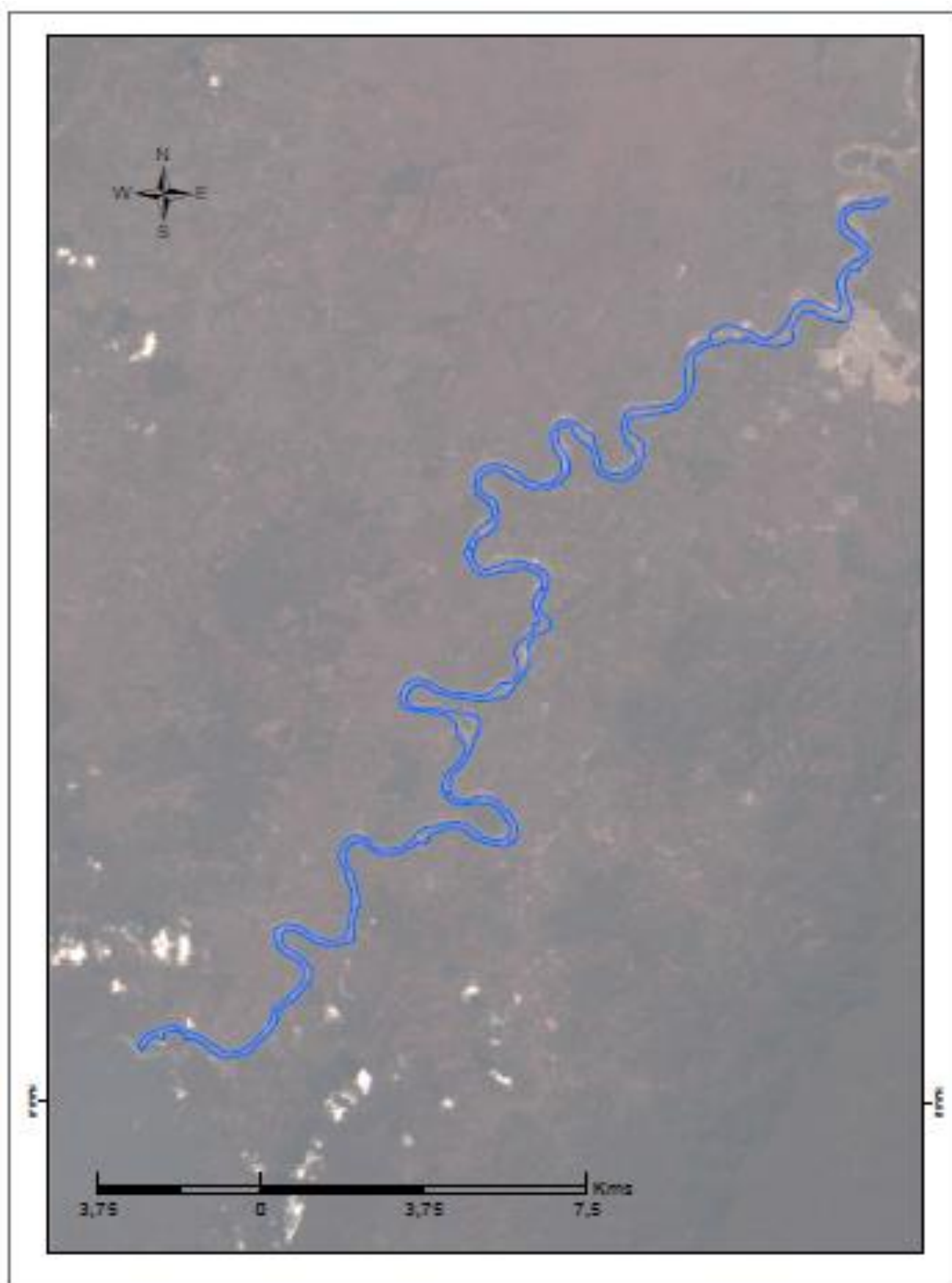


Figura 80. Superposición de imágenes Landsat río Sinú 2005-2014

La Figura 81, indica las abscisas proyectadas sobre la forma en planta del río Sinú para el año 2005, las presentan un trazado equidistante.

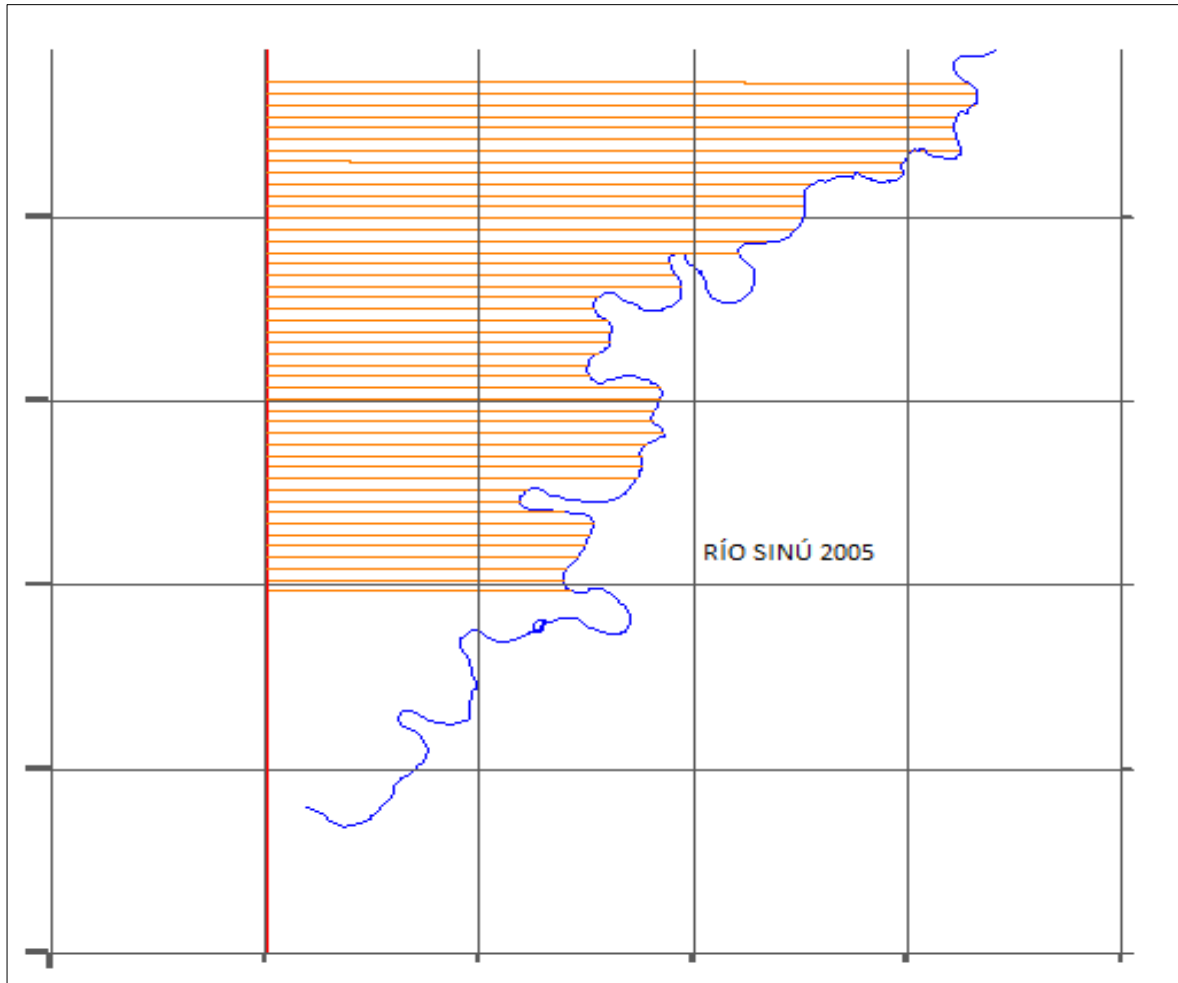


Figura 81. Abscisas proyectadas sobre la forma en planta del río Sinú en 2005

Las formas en planta para el río Sinú en el periodo 2005 - 2014, presentan un trazado muy similar, tal como lo demuestra la Figura 82. La diferencia entre las longitudes de las abscisas aumenta en comparación con los periodos post-embalse, que presentaban una tendencia a la baja. Sin embargo, los ríos son dinámicos y las variaciones en planta presentadas en un periodo de análisis de aproximadamente 10 años, así lo demuestran.

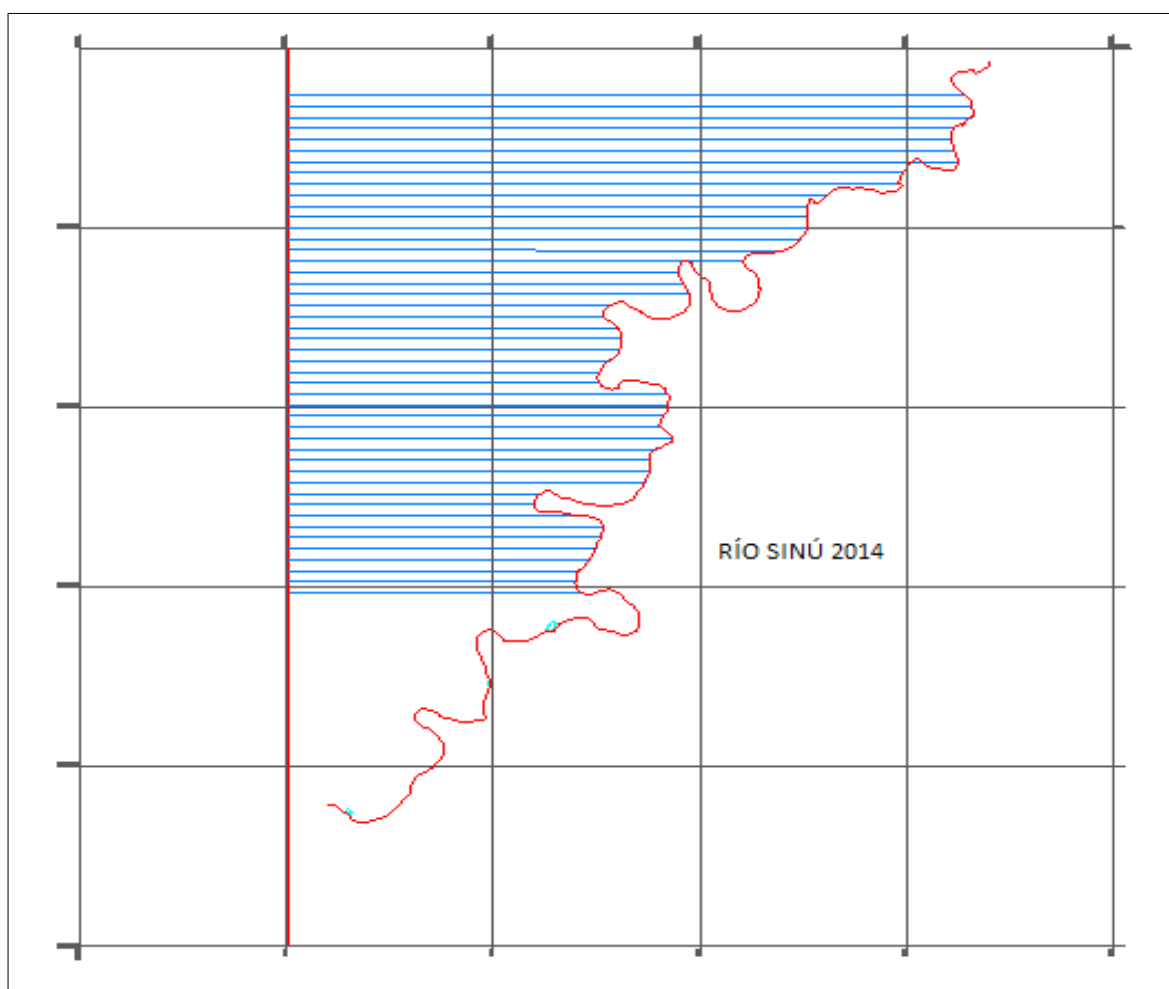


Figura 82. Abscisas proyectadas sobre la forma en planta del río Sinú en 2014

8.2.4.1 Diferencia de la distancia relativa

La Figura 83, indica las longitudes de las abscisas proyectadas sobre el río Sinú para los años 2005 y 2014, la diferencia de longitud entre las abscisas proyectadas, es el valor de la distancia relativa para cada punto.

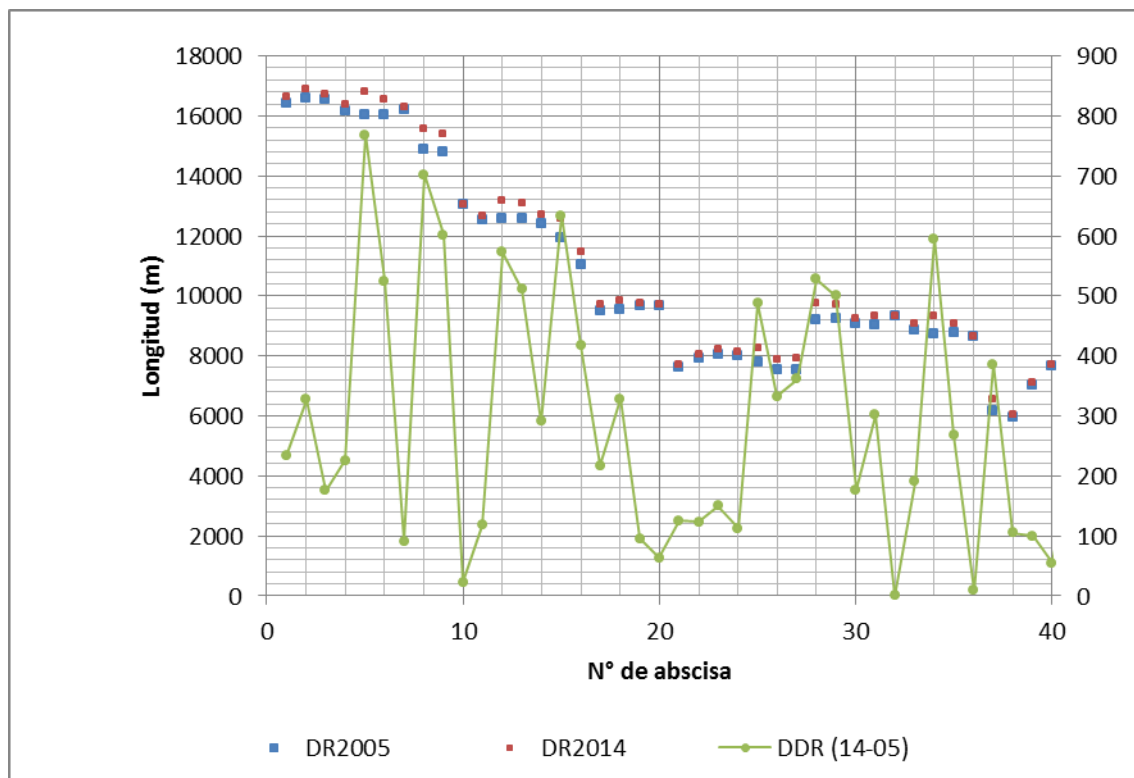


Figura 83. Longitud de abscisas proyectadas sobre el río Sinú 2005-2014

La media del indicador diferencia en la distancia relativa para el río Sinú en el periodo 2005-2014 es de 272.98 m, tal como se indica en la Figura 184.

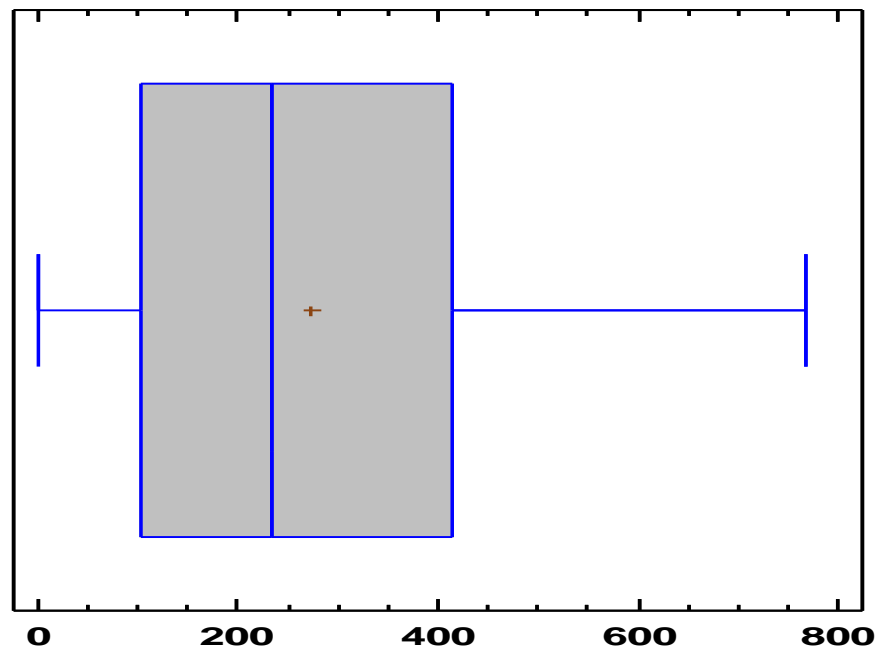


Figura 84. Diferencia en la distancia relativa sobre el río Sinú 2005-2014.

- **Validación del modelo estadístico de regresión lineal**

La media del indicador diferencia de la distancia relativa para el río Sinú en el periodo 2005-2014 es de 272.98 m, La diferencia de la distancia relativa en el río Sinú para el año 2014, estimada a partir del modelo estadístico propuesto es de 107.45 m, para 165 pulsos de caudal altos y una tasa de descenso de caudal de 67.5 m³/s al día, tal como se indica en la Figura 85.

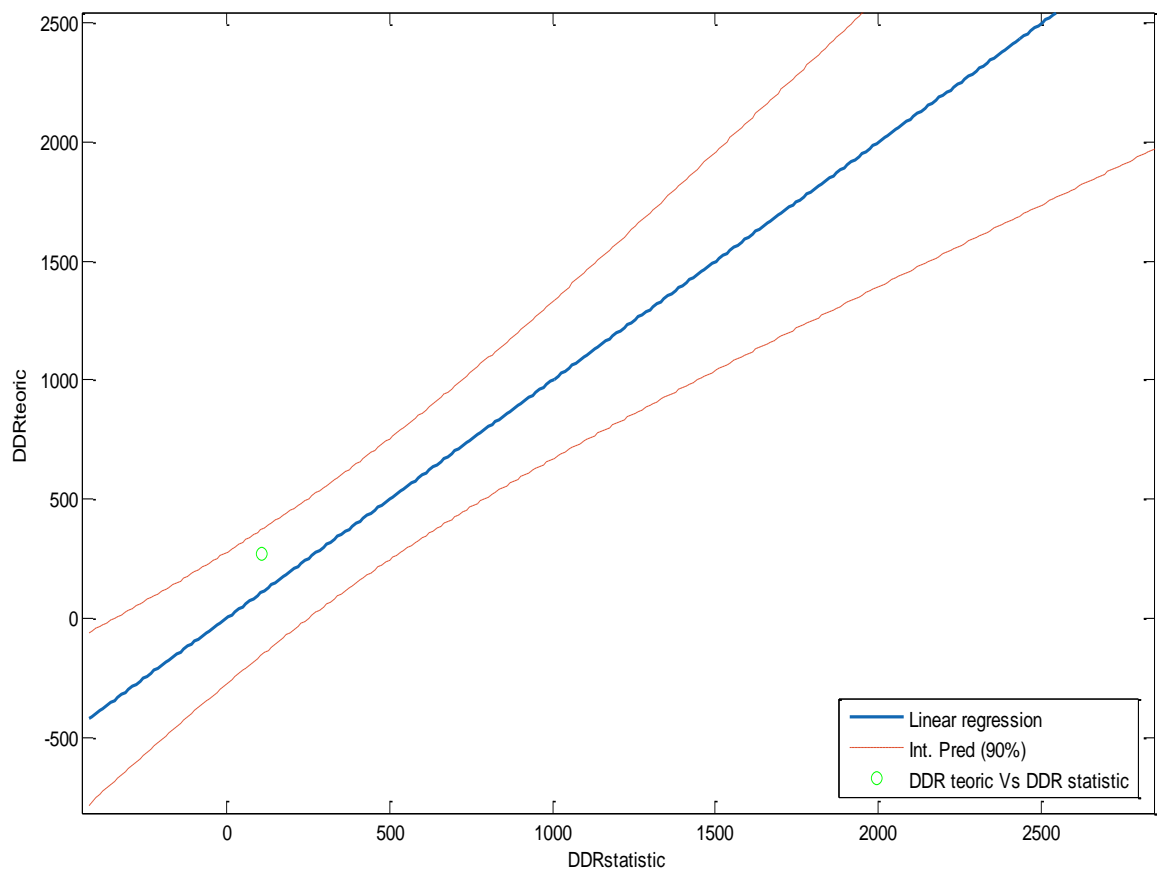


Figura 85. Validación del modelo de regresión lineal para la DDR

- **Validación del modelo estadístico de regresión no lineal**

La diferencia para la distancia relativa en el río Sinú para el año 2014, estimada a partir del modelo estadístico propuesto es de 397.25 m, para una tasa de descenso de caudal de 67.5 m³/s al día.

En la Figura 86, se observa que el valor teórico en la diferencia de la distancia relativa para el río Sinú en el año 2014, se localiza dentro de los intervalos de predicción del modelo y su valor aproxima al estimado por el modelo estadístico.

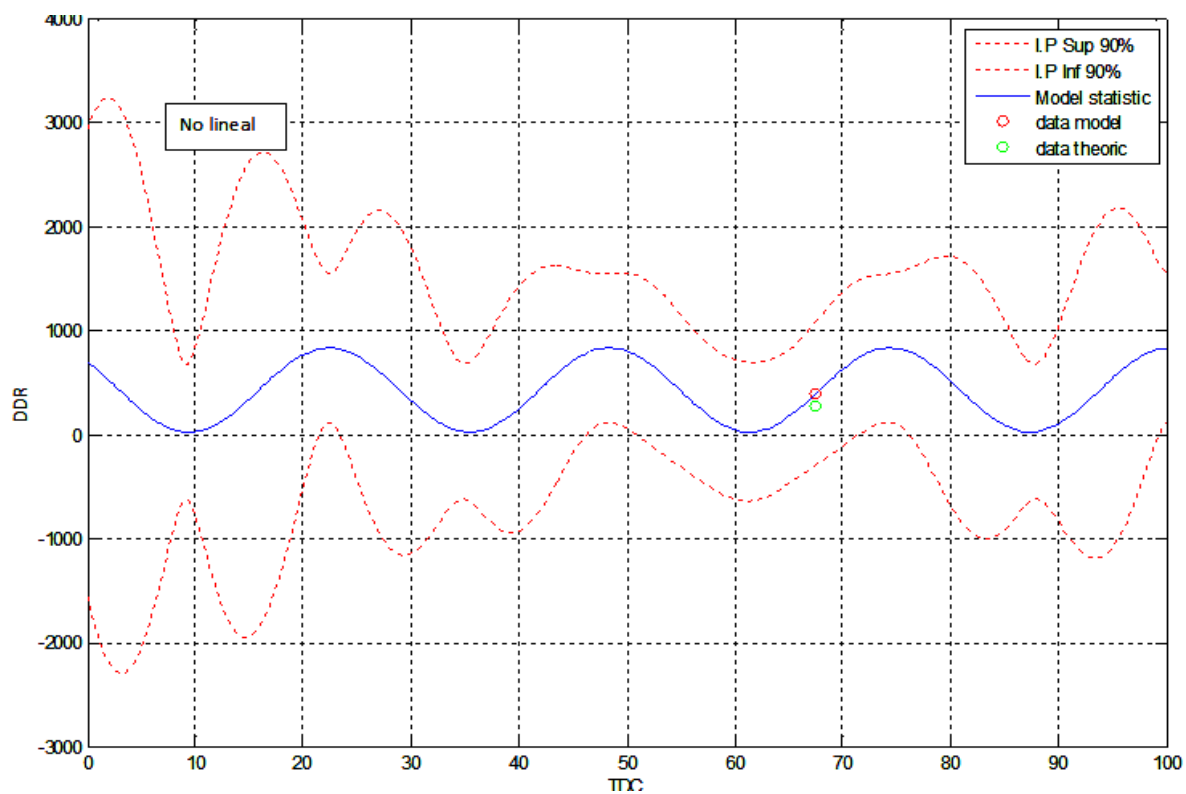


Figura 86. Validación del modelo de regresión no lineal para la DDR.

9. ANÁLISIS DE RESULTADOS ESTADÍSTICOS

9.1. Factor de migración lateral

Los modelos estadísticos seleccionados para describir el comportamiento del factor de migración lateral, comprenden: un modelo de regresión lineal y uno de regresión no lineal.

En el modelo de regresión lineal las variables, tales como: La duración de caudales altos, el número de pulsos con caudales altos (Promedio anual) y la tasa de descenso de caudal, son significativas en el comportamiento del factor de migración lateral. Mientras que, para el modelo de regresión no lineal, la tasa de descenso de caudal es la variable significativa.

Por otra parte, el modelo lineal presenta un mejor comportamiento, con un 2% en la desigualdad del valor observado sobre la predicción comparado con el 18% que presenta el modelo no línea, tal como se indica en la Figura 87.

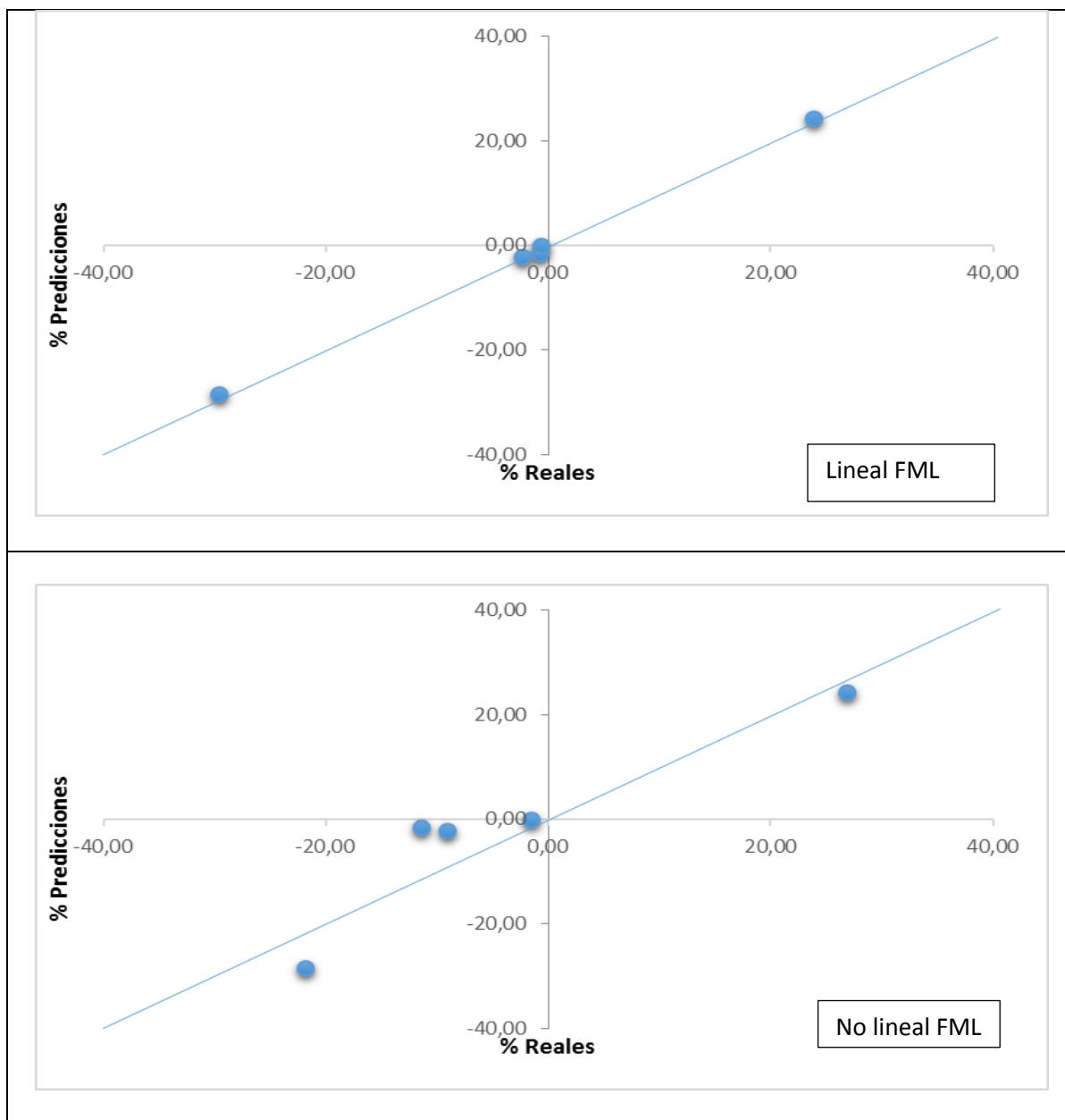


Figura 87. Diagramas de theil comparativos para los modelos del factor de migración lateral

Al ajustar la predicción del modelo estadístico y la predicción del valor teórico, mediante una regresión lineal, se observa que el modelo lineal presenta un coeficiente de determinación cercano al 100%, influenciado posiblemente por el número de variables incluidas en el modelo y con una mínima desviación estándar. A diferencia, del ajuste observado en el modelo no lineal el cual presenta un coeficiente de determinación cercano al 83%, tal como se indica en la Figura 88.

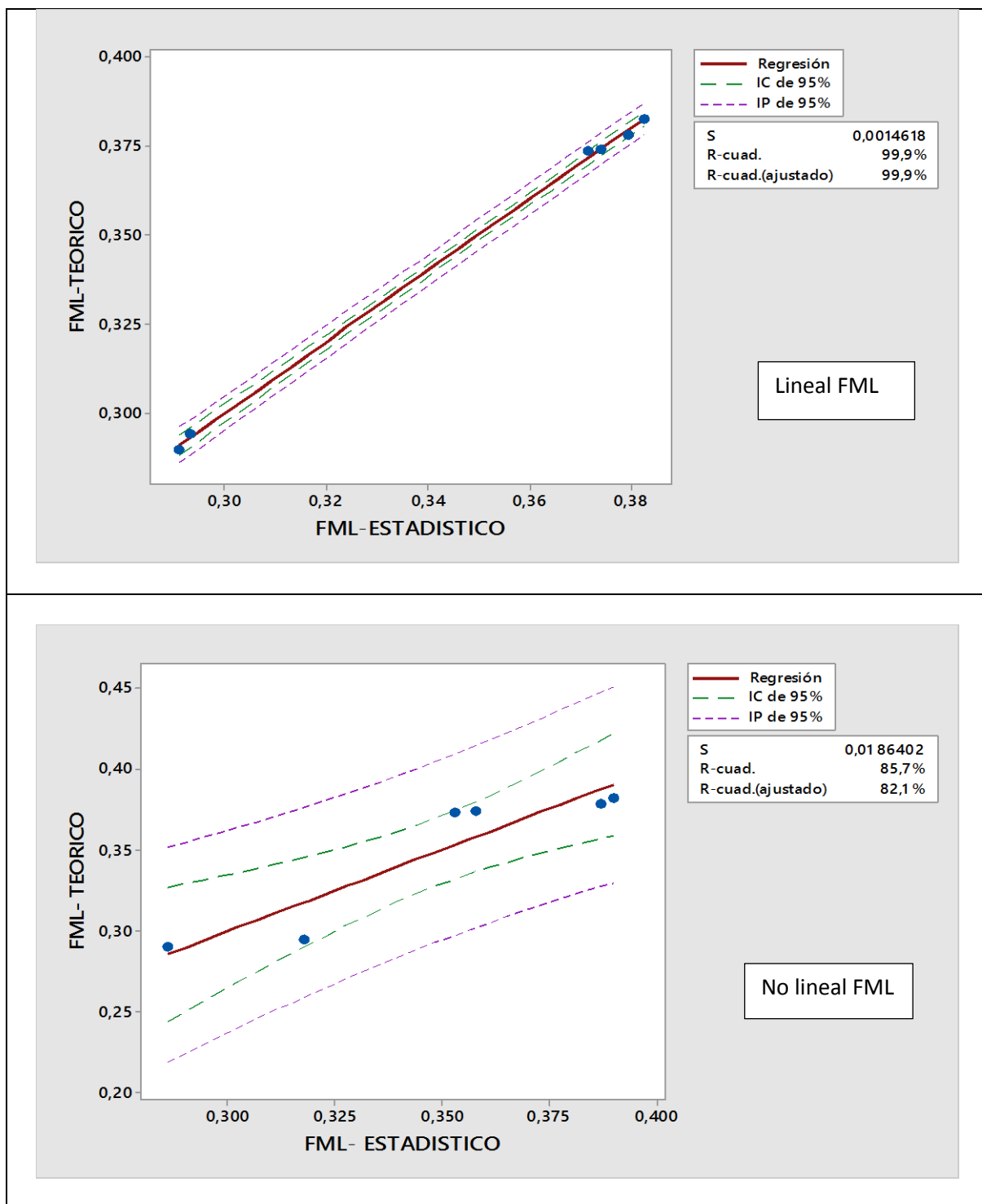


Figura 88. Diagramas de predicción comparativos para los modelos del factor de migración lateral.

El modelo de regresión lineal para el factor de migración lateral, presenta un mejor ajuste a los datos, un mejor indicador U de Theil y un r- cuadrado del 99%. Sin embargo, el valor de la validación se ubica por fuera del intervalo de predicción. Caso contrario, al presentado en la validación del modelo no lineal con valores dentro del intervalo de predicción, tal como se indica en la Figura 89.

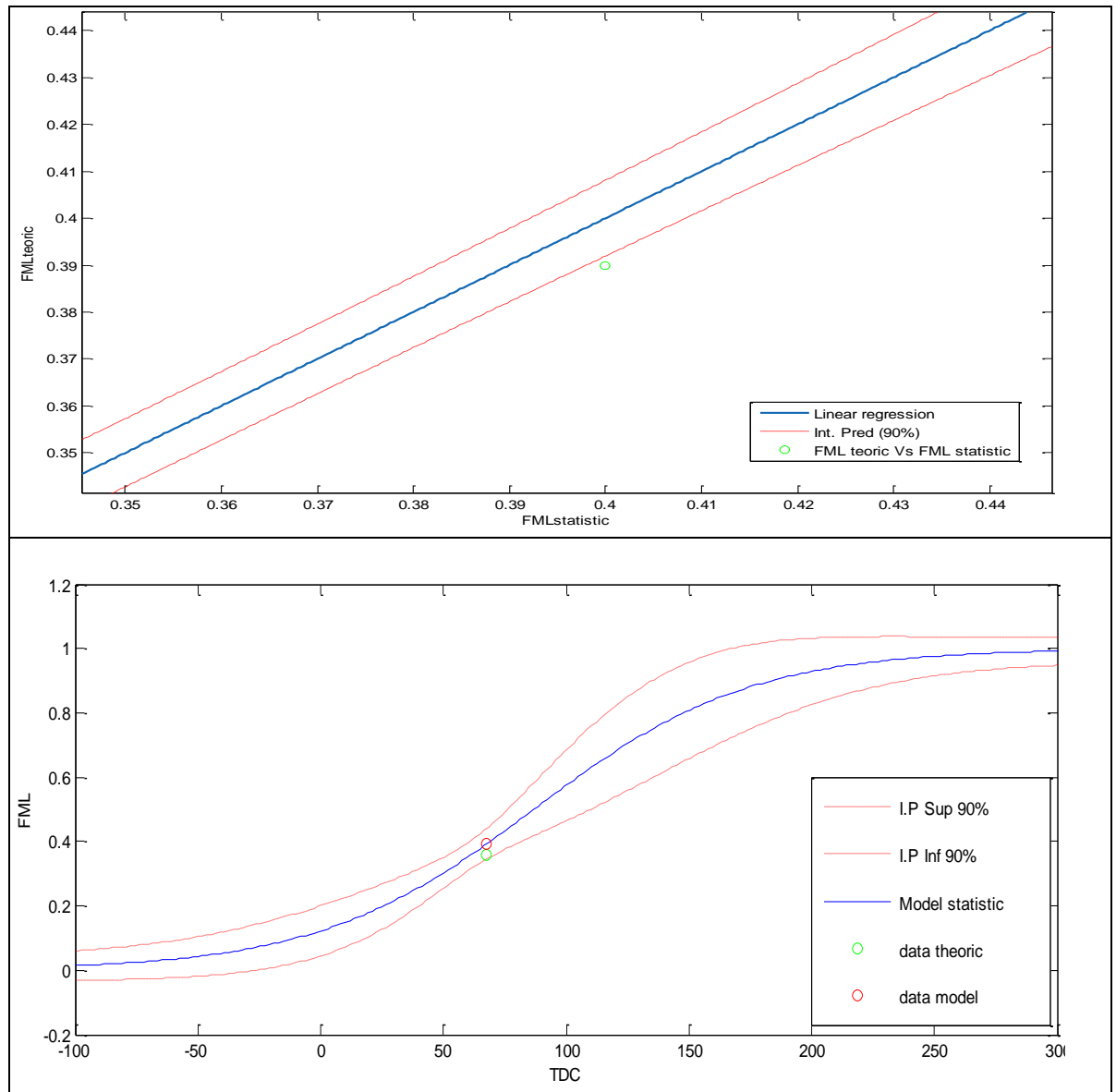


Figura 89. Diagramas de validación comparativos para los modelos del factor de migración lateral.

En síntesis, entre las variables hidrológicas analizadas en la descripción de indicadores de cambio morfológico en ríos, tales como: número de pulsos de caudal

alto, duración de caudal alto, promedio anual de pulsos de caudal alto y tasa de descenso de caudal, el mejor modelo para describir el comportamiento del factor de migración lateral desde la perspectiva estadística, es un modelo de regresión no lineal, que depende de una variable significativa denominada “Tasa de descenso de caudal”.

La relación entre las tasa de descenso de caudal y el factor de migración lateral, son intrigantes porque sugieren un comportamiento recurrente, como todo fenómeno en la naturaleza.

El modelo indica que las variaciones en los flujos de energía representada en los descensos de caudal, se relaciona con el proceso de migración lateral que presenta el río. Es decir, que con el aumento de las tasas de descenso y la consecuente disminución de la presión intersticial del suelo, se aceleran los procesos de erosión por lavado de la superficie, formación de cárcavas profundas y remoción en masa, procesos denudativos característicos de la migración lateral en cauces.

Cuando los descensos en los niveles del río son lentos, se mantiene la estabilidad en la banca. Sin embargo, la tendencia indica el aumento de la migración lateral, con un rápido descenso en los caudales.

9.2. Sinuosidad

Los modelos estadísticos seleccionados para describir el comportamiento de la sinuosidad, comprenden: un modelo de regresión lineal y uno de regresión no lineal.

Desde una perspectiva estadística, el comportamiento de los modelos seleccionados para la sinuosidad es similar. Inicialmente, los modelos presentan como única variable significativa a la tasa de descenso de caudal y en indicadores estadísticos, tales como: el U de Theil, los valores varían entre el 11% y 14%, en la desigualdad del valor observado sobre la predicción, tal como se indica en la Figura 90.

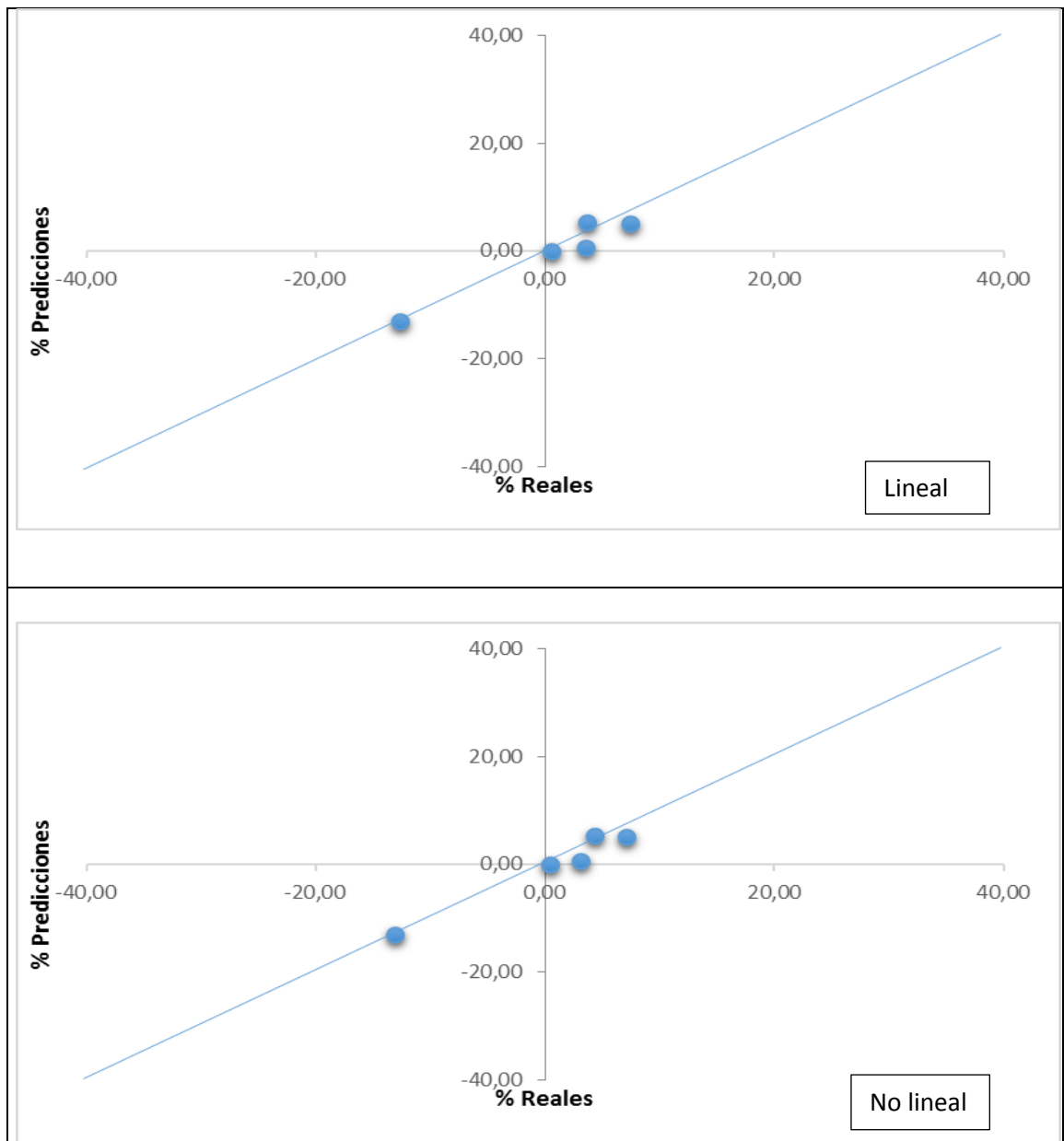


Figura 90. Diagramas de theil comparativos para los modelos de la sinusidad

De igual forma, la regresión entre los valores de la predicción teórica y de predicción estadística presenta un comportamiento similar, para los modelos de la sinusidad. Sin embargo, el coeficiente de determinación es mayor en el modelo de regresión no lineal, tal como se indica en la Figura 91.

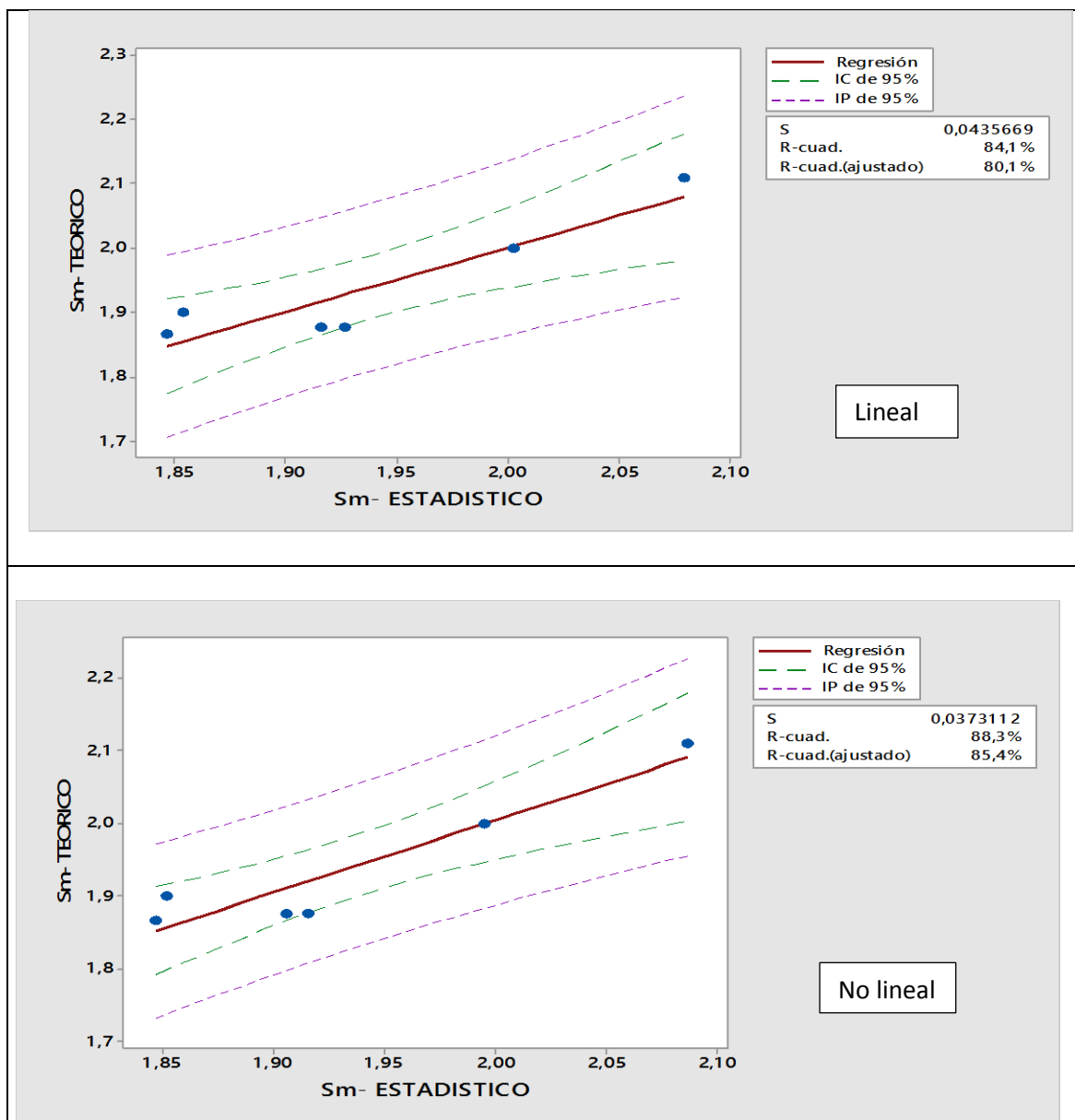


Figura 91. Diagramas de predicción comparativos para los modelos de la sinuosidad

Los modelos seleccionados para la sinuosidad presentan un buen comportamiento en la validación, con valores dentro del intervalo de predicción, tal como se indica en la Figura 92.

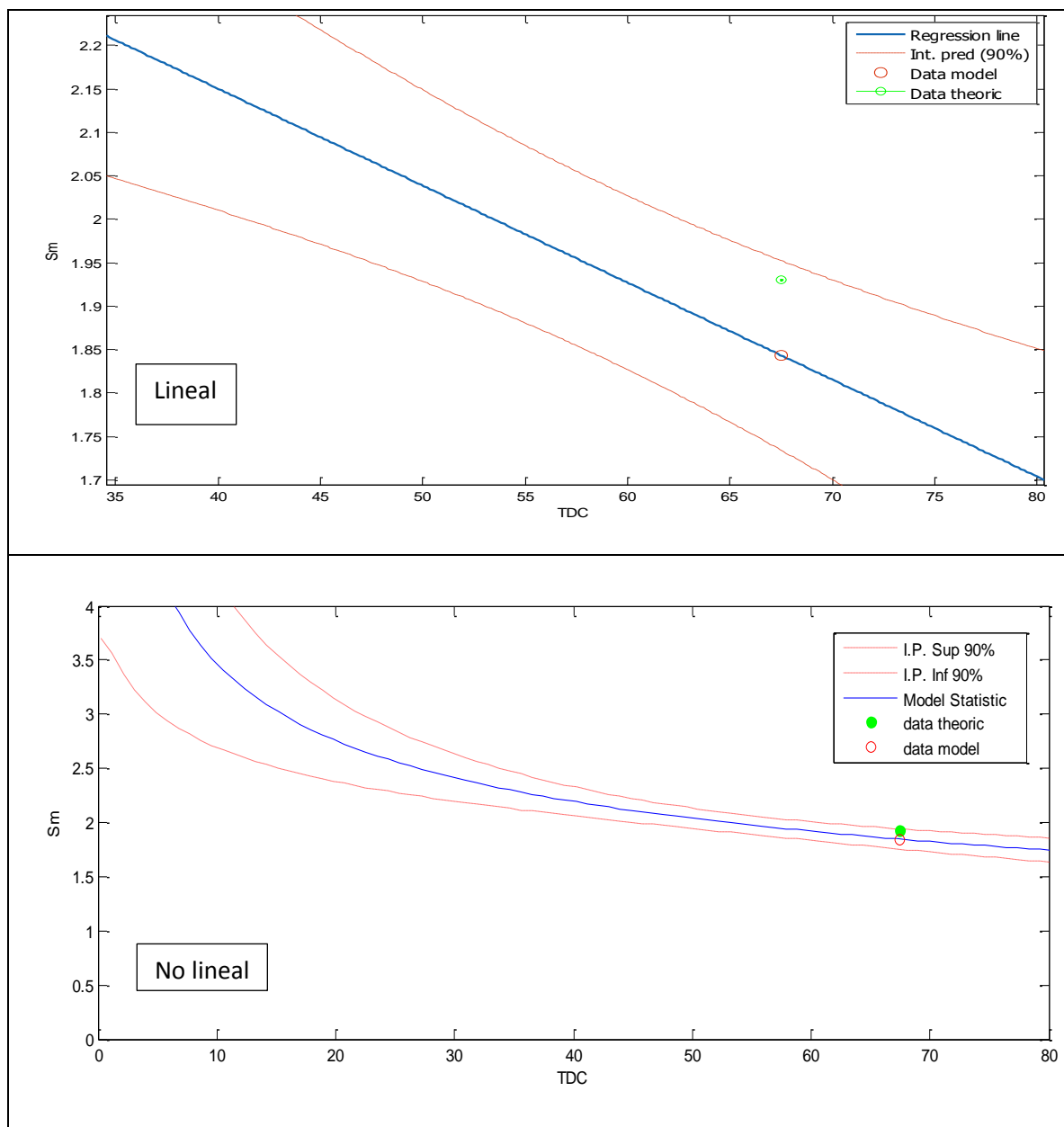


Figura 92. Diagramas de validación comparativos para los modelos de la sinusidad

La sinusidad es un proceso morfológico complejo generado en ríos y evaluado a gran escala. De todas las variables examinadas en la presente investigación, tales como: número de pulsos de caudal alto, duración de caudal alto, promedio anual de pulsos de caudal alto y tasa de descenso de caudal, esta última parece ejercer un mayor efecto sobre la sinusidad. Los modelos de regresión lineal y no lineal desarrollados para la sinusidad, básicamente describe desde la perspectiva es-

tadística, que el proceso morfológico de la sinuosidad depende de una variable significativa, como lo es la tasa de descenso de caudales.

La tasa de descenso en caudales y la sinuosidad no están directamente relacionadas, pero existen unos patrones de comportamiento que permiten identificar cierta correlación inversa entre las variables.

En ríos con regímenes de caudales estables, en los cuales las tasas de descenso en los caudales sean pequeñas, la potencia del flujo permanecerá constante, favoreciendo que sean activos los procesos de erosión, transporte y sedimentación. Generando, la formación de cauces sinusoidales.

Caso contrario, cuando se presentan descensos muy rápidos en los caudales, al modificarse el flujo de energía transportado, cambia la potencia y competencia de la corriente y con ello se modifican los procesos de erosión, transporte y sedimentación. La reducción de caudal influye directamente en la disminución de la dinámica, favoreciendo la estabilidad en río rectos o con sinuosidad baja ($S_m \cong 1$), al disminuir la actividad en las márgenes erosivas y restringir la capacidad de movilización y transporte del caudal sólido.

9.3. Diferencia en la distancia relativa

Los modelos estadísticos seleccionados para describir el comportamiento la diferencia en la distancia relativa, comprenden: un modelo de regresión lineal y uno de regresión no lineal.

En el modelo de regresión lineal las variables, tales como: El número de pulsos con caudales altos y la tasa de descenso de caudal, son significativas en el comportamiento de la diferencia en la distancia relativa de dos cauces. Mientras que, para el modelo de regresión no lineal, la tasa de descenso de caudal es la variable significativa.

Por otra parte, el modelo no lineal presenta un mejor comportamiento, con un 38% en la desigualdad del valor observado sobre la predicción comparado con el modelo lineal que presenta el 90%, tal como se indica en la Figura 93.

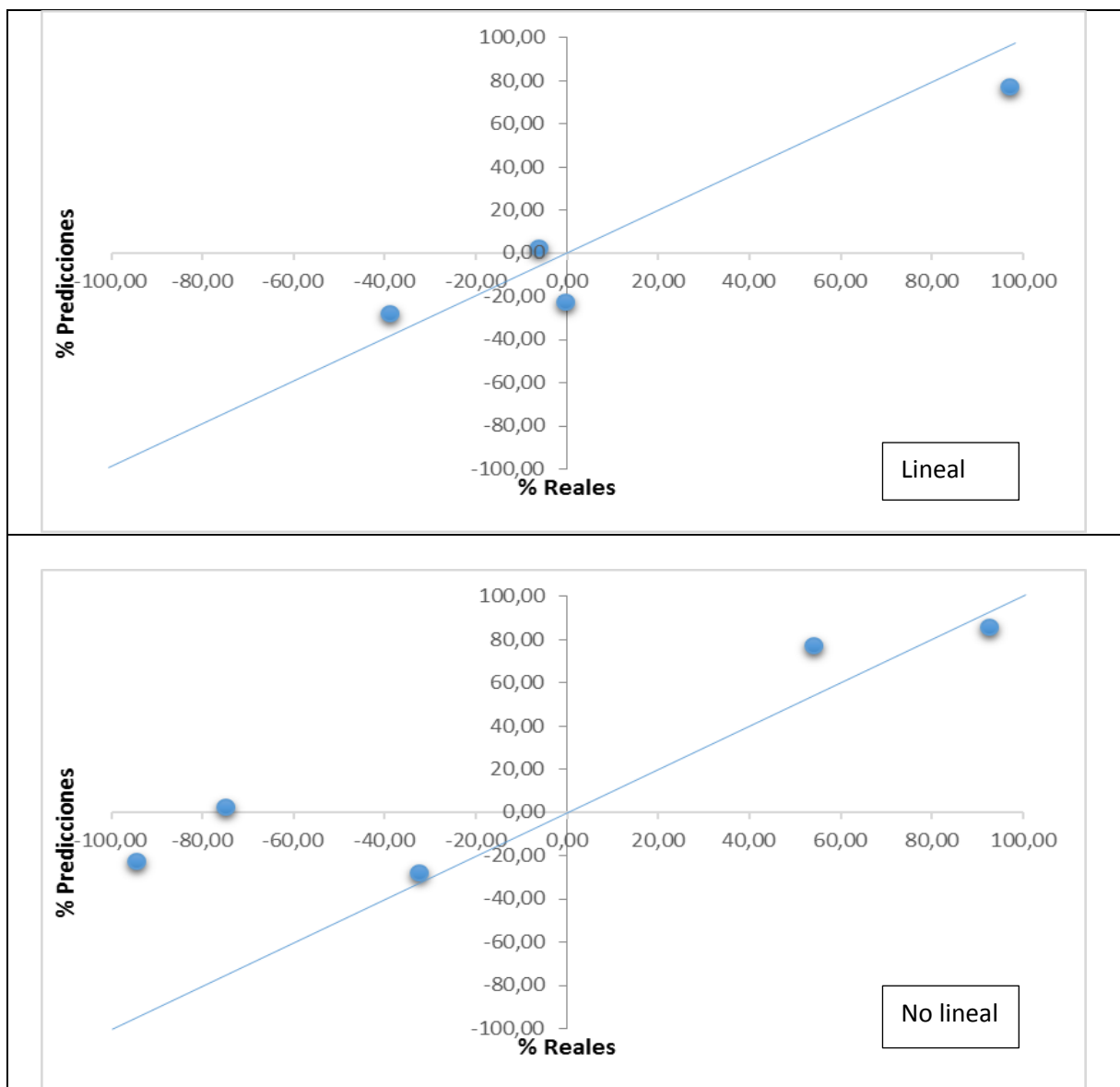


Figura 93. Diagramas de theil comparativos para los modelos de la Diferencia en la distancia relativa.

Al ajustar la predicción del modelo estadístico y la predicción del valor teórico, mediante una regresión lineal, se observa que el modelo lineal presenta un coeficiente de determinación cercano al 90%. A diferencia, del ajuste observado en el modelo no lineal, en la cual algunos valores de la regresión se ubicaron por fuera del intervalo de confianza y presentan un coeficiente de determinación cercano al 86%, tal como se indica en la Figura 94.

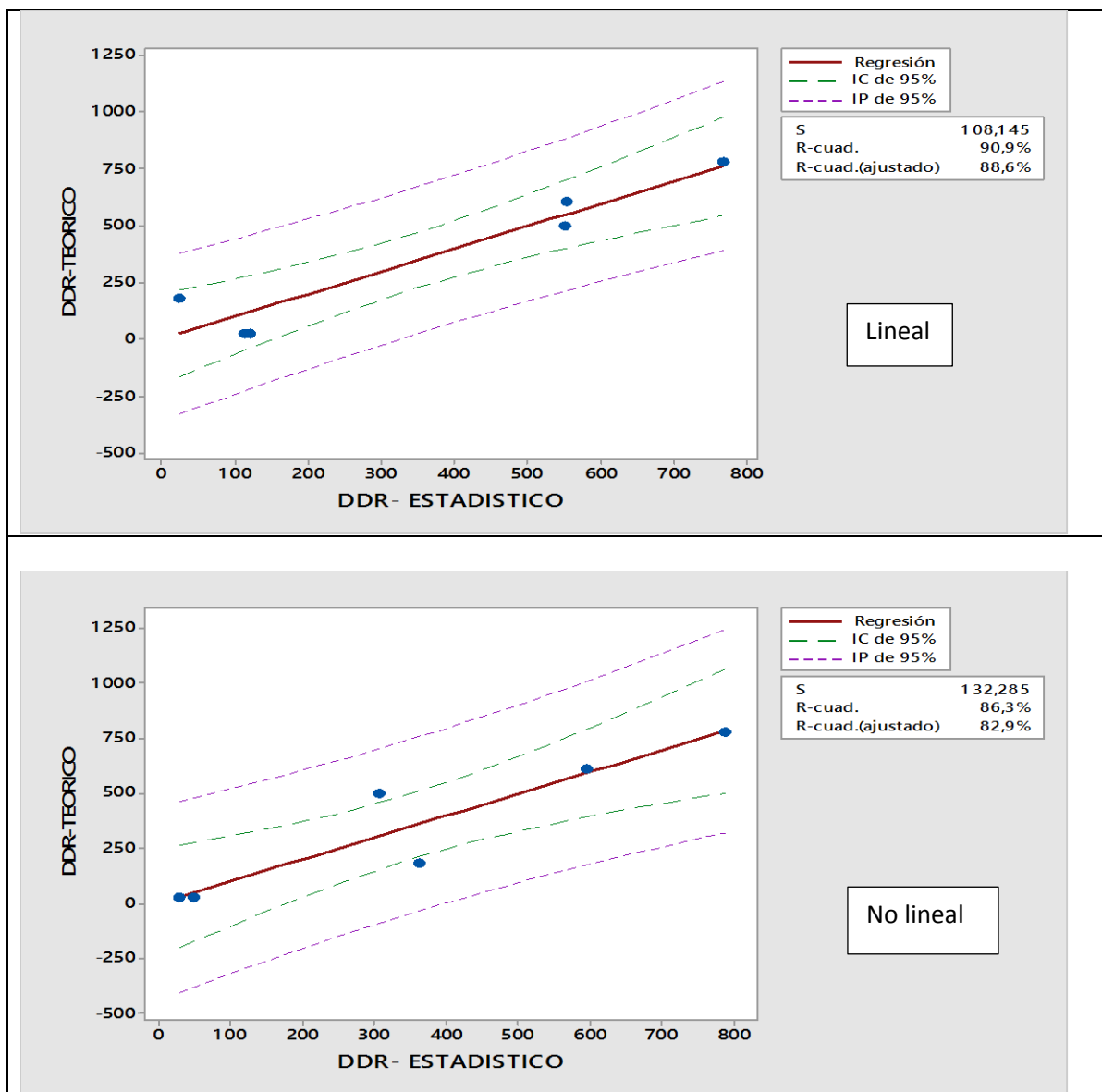


Figura 94. Diagramas de predicción comparativos para los modelos de la DDR

En la validación de los modelos estadísticos seleccionados para la diferencia de la distancia relativa entre dos causas, los valores de validación se ubicaron dentro de los intervalos de predicción, tal como se indica en la Figura 95.

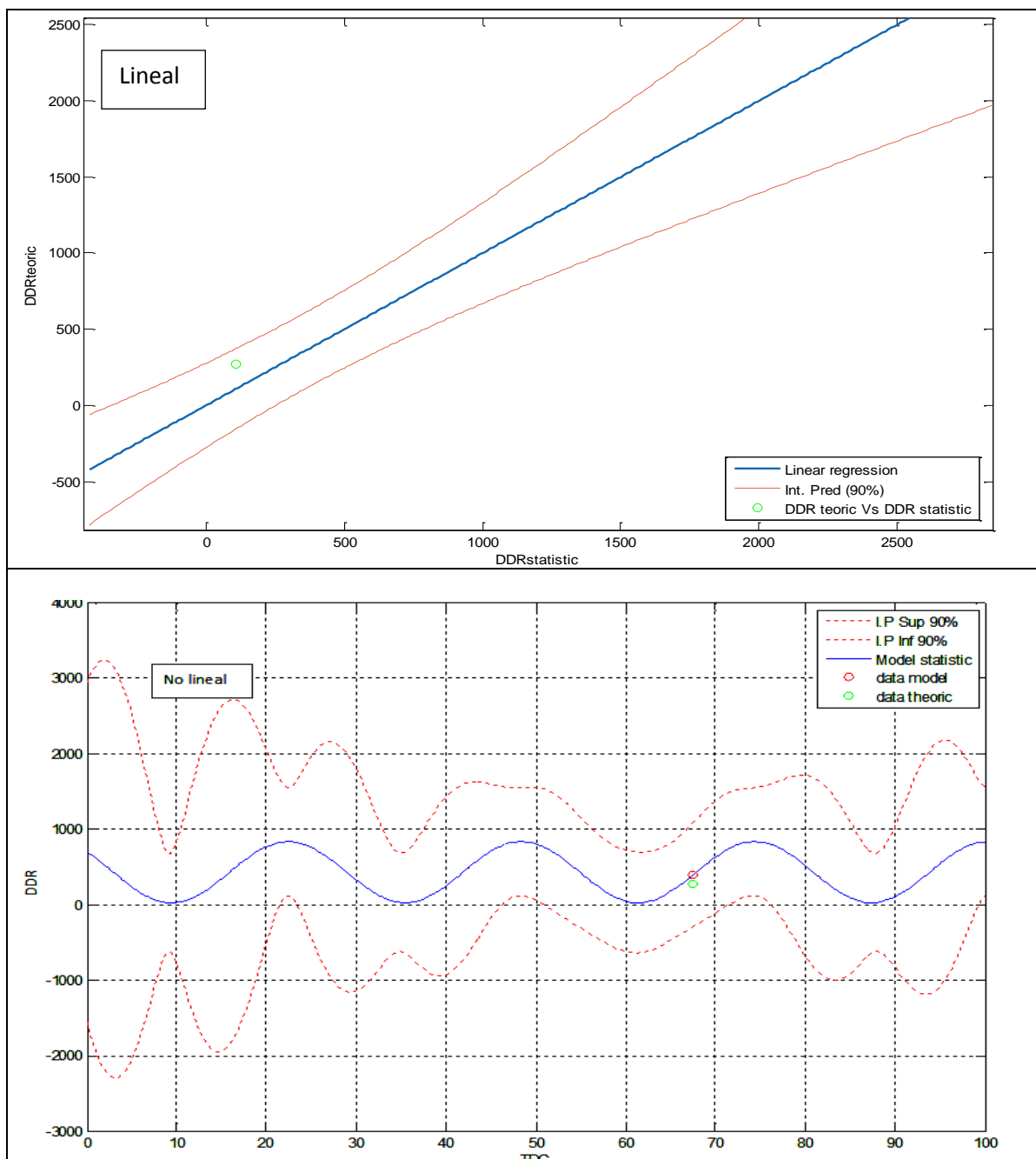


Figura 95. Diagramas de validación comparativos para los modelos de la DDR

Teniendo en cuenta, las variables exclusivamente analizadas en la presente investigación y desde una perspectiva estadística, el mejor modelo para describir el comportamiento de la diferencia en la distancia relativa de dos cauces, es el modelo de regresión no lineal seleccionado, el cual depende de una variable significativa denominada “Tasa de descenso de caudal”.

Por tanto, la diferencia de la distancia relativa entre dos cauces es una medida de la fuerza de resistencia a la movilidad del lecho, por efecto de la variación en la energía del flujo, representado en las tasas de descenso de caudal.

10. CONCLUSIONES

1. Se determinó la causalidad lineal entre la tasa de descenso en los caudales e indicadores morfológicos como la sinuosidad y la diferencia en la distancia relativa de dos cauces. De igual forma, las correlaciones no lineales presentaron mejor comportamiento en el proceso de validación para la sinuosidad y el factor de migración lateral.

2. Se desarrollaron dos modelos estadísticos para representar la Sinuosidad y un modelo estadístico para el Factor de Migración Lateral y para la Diferencia en la Distancia Relativa, que son:

$FML = (EXP(-1,97 + 0,0227 * TDC) / (1 + EXP(-1,97 + 0,0227 * TDC)))$
$Sm = 7.4 * TDC^{(-0.33)}$
$Sm = 2,6 - 0,011 * TDC$
$DDR = 2157 + 1,74 * NPCA - 34,62 * TDC$

En esta investigación se propuso el indicador de Diferencia en la Distancia Relativa (DDR) para evaluar el nivel de evolución temporal morfológica del río, permitiendo generar muestras para comprar la evolución del río estadísticamente:

$$DDR = 2157 + 1,74 * NPCA - 34,62 * TDC$$

- La tasa de descenso en el caudal resultó significativa para todos los modelos propuestos. Esto muestra que el proceso de descenso del hidrograma tiene un impacto importante sobre los procesos morfológicos del río, especialmente cuando se presentan varios pulsos del hidrograma en el tiempo de análisis.
- Es necesario contar con más información de imágenes satelitales en años posteriores para tener una mejor validación de los modelos propuestos para este sector. Es importante aclarar que esta zona del país no cuenta con suficientes imágenes satelitales históricas previas al 2014.

- Aunque esta metodología puede ser aplicable a otros ríos de planicie con características similares a las del río Sinú, los coeficientes estimados son solo aplicables para el río Sinú. Para el análisis de otros ríos será necesario utilizar la metodología y calibrar los coeficientes propios del cauce.

11. BIBLIOGRAFIA

Acreman, M. & Dunbar, M.J., 2004. Defining environmental river flow requirements- A review hydrology and Earth system Sciences, (8-5), pp. 861-876.

Agualimpia, Y. & Castro, C., 2006. Metodologías para la determinación de los caudales ecológicos en el manejo de los recursos hídricos, Tecnogestión, (3-1), pp. 1-13.

Altunin, S.T., 1962. Regulación de Ríos. Editorial Agricultura, Moscú (in Russian). pp 362.

Arthington, A.H., 1998. Comparative evaluation of environmental flow assessment techniques: Review of holistic methodologies, Land and Water Resources Research and Development Corporation, (26), pp.46.

Ashraf, F. and Liu, X., 2013. River Meandering Prediction: Case Studies for Four Rivers in Texas, World Environmental and Water Resources Congress 2013, pp. 2009-2019.

Bagnold, R.A., 1960. Sediment discharge and stream power; a preliminary announcement, United States Geological Survey, Professional Paper 282-E, pp. 135–144.

Briaud J.L., Ting, F., Chen, H.C., Cao, Y., Han, S.W., Kwak, K.W., 2001. Erosion function apparatus for scour rate predictions, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, (127-2), pp.105-113.

Briaud, J.L., 2005. Erodibility of fine grained soils and new soil test. erosion of soils and scour of foundations, ASCE; pp. 1-10.

Buchanan, B.P., Nagle, G.N., Walter, M.T., 2014. Long-term monitoring and assessment of a stream restoration project in central New York, River Research and Applications, (30-2), pp. 245-258

Castro, L.M., Carvajal, Y., Monsalve, E., 2006. Enfoques teóricos para definir el caudal ambiental, Ingeniería y Universidad, (10 -2), pp. 1-27.

Chen, D. and He, L., 2013. Modeling sediment transport in sine-generated meandering channels, World Environmental and Water Resources Congress 2013, pp. 1992-1999.

Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge (CVS), 2004. Diagnóstico Ambiental de la Cuenca Hidrográfica del Río Sinú.

Crosato, A., 1990. Simulation of meandering river processes, Communication on hydraulic and Geotechnical Engineering, (90-3), Delft University of Technology, ISSN 0196-6548.

Culbertson, D.M., Young, L.E. and Brice, J.C., 1967. Scour and fill in alluvial channels. U.S. Geological Survey, Open File Report, pp. 58.

Duan, J.G. & Julien, P.Y., 2010. Numerical simulation of meandering evolution, Journal of hydrology, (391-1), pp. 34-46

Fernández Yuste, J.A. & Magdaleno, M.F., 2011. La restauración fluvial del Ebro medio a través del análisis de su dinámica ecológica e hidrogeomorfológica, I congreso ibérico de restauración fluvial, León, España.

Hooke, J.M., 2007. Spatial variability, mechanisms and propagation of change in an active meandering river. Geomorphology, (84-3), pp. 277-296.

Hua Guo, Qi Hu, Qi Zhang, Song Feng, 2012. Effects of the Three Gorges Dam on Yangtze River flow and river interaction with Poyang Lake, China: 2003–2008, Journal of Hydrology, (416–417), 24, pp. 19-27,

IDEHA, 2005. Estudios y diseños de obras de ingenierías para la protección contra la erosión lateral causada por el río Sinú en Tierralta-Cordoba. Informe final de consultoría, Universidad del Norte.

Ikeda, S., Parker, G. and Sawai, K., 1981. Bend theory of river meanders, *Journal Fluid Mech*, (112), pp. 363-377.

Jansson, R., Backx, H., Boulton, A. J., Dixon, M., Dudgeon, D., Hughes, F. M. R., Nakamura, K., Stanley, E. H. and Tockner, K., 2005. Stating mechanisms and refining criteria for ecologically successful river restoration: a comment on . *Journal of Applied Ecology*, 42, pp. 218–222

Kashyap, S., Constantinescu, G., Rennie, C., Post, G., and Townsend, R., 2012. Influence of channel aspect ratio and curvature on flow, secondary circulation, and bed shear stress in a rectangular channel bend, *Journal of Hydraulic Engineering*, (138-12), pp. 1045–1059.

Karim, K., Gubbels, M.E., and Goulter, I.C., 1995. Review of determination of in-stream flow requirements with special application to Australia, *Water Resources Bulletin*, (31), pp. 1063-1077.

Keady, D.M. & Priest, M.S., 1977. The downstream migration rate of river meandering patterns, *Proceedings 12th Mississippi Water Resources Conference*, Jackson, MS, pp. 29-34.

Lagasse, P. F., Spitz, W. J., Zevenbergen, L. W., and Zachmann, D.W., 2004. Methodology for predicting channel migration, *National Cooperative Highway Research Program*, pp. 155.

Latrubesse, E.M., Stevaux, J.C., Sinha, R., 2005. Tropical rivers, *Geomorphology*, (70-3), pp. 187-206.

Leopold, L. B. & Wolman, M. G., 1957. River channel patterns; braided, meandering and straight: *U.S. Geological Survey Professional Paper*, (282-B).

Magilligan, F.J. & Nislow, K.H., 2005. Changes in hydrologic regime by dams, *Geomorphology*, (71), pp. 61-78.

Malhotra, S.L, 1951. Effects of barrages and weirs on the regime of rivers, *Proc. Int. Assoc. hydraul. 4th meeting*, pp. 335-347.

Mosselman, E., 1992. Mathematical modelling of morphological processes in rivers with erodible cohesive banks, communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering,(92-3), Delft University of Technology, ISSN 0169-6548

Nanson, G.C. & Hickin, E.J., 1983. Channel migration and incision on the Beatton River, Journal of the Hydraulic Engineering, ASCE, (109-3), pp. 327-337.

Nanson, G.C. & Hickin, E.J., 1984. Lateral migration rates of river bends, Journal of the Hydraulic Engineering, ASCE, (110), pp. 1557-1567.

Odgaard, A.J., 1987. Streambank erosion along two rivers in Iowa, water resources, (23), pp 1225-1236.

Palmer, M.A., Bernhardt, E.S., Allan, J.D., Lake, P.S., Alexander, G., Brooks, S., Carr, J., Clayton, S., Dahm, C., Follstad Shah, J., Galat, D.J., Gloss, S., Goodwin, P., Hart, D.H., Hassett, B., Jenkinson, R., Kondolf, G.M., Lave, R., Meyer, J.L., O'Donnell, T.K., Pagano, L., Srivastava, P. & Sudduth, E., 2005. Standards for ecologically successful river restoration. Journal of Applied Ecology, 42, 208–217

Parker, G., 1983. Theory of meander bend deformation, Conference rivers 1983, C.M. Elliot, Ed., ASCE, pp. 722-732.

Petts, G., Gurnell., A., 2013. Hydrogeomorphic effects of reservoirs, dams and diversions, Treatise on Geomorphology, Academic Press, (13), pp. 96–114.

Pyerce, R., 2004. Hydrological low flow indices and their uses, Watershed Science Center, (04), pp. 33.

Richter, B.D., J.V. Baumgartner, J. Powell, D.P. Braun, 1996. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. Conservation Biology 10:1163-1174.

Schumm, S. A., 1968. Speculations concerning paleohydrologic controls of terrestrial sedimentation, Geological Society of America Bulletin, (79), pp. 1573-1588.

Stevens, M. A. and Nordin, C. F., 1987. Critique of the regime theory for alluvial channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, (113-11), pp. 1359-1380.

Tealdi, S., Camporeale, C., Ridolfi, L., 2011. Long-term morphological river response to hydrological changes, *Advances in Water Resources*, (34-12), pp. 1643-1655.

Terzaghi, K., 1926. *Principles of soil mechanics: A summary of experimental studies of clay and sand*, New York: McGraw – Hill.

Tharme, R.E., 2003. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers, *River Research and Applications*, (19), pp. 397-441.

Thorne, C. and Simons, D., 1983. Discussion of "Mathematical Model for Erodible Channels", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, (109-4), pp. 653-655.

USACE, 1994. Channel response and channel forming discharge: literature review and interpretation, First Interim Report for the U.S. Army Contract Number R&D 6871-EN-01, USACE, pp. 60.

Vélez Flórez, A. J., 2009. Propuesta metodológica párrafo la evaluación y cuantificación de la alteración del régimen de caudales de corrientes alteradas antrópicamente, Caso Urrá I, Tesis de Maestría en aprovechamiento de recursos hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia.

Ward and Tockner, 2001. Biodiversity: towards a unifying theme for river ecology, *Freshwater Biology*, (46), pp. 807–819.

Ward J.V., Tockner K., Schiemer F., 1999. Biodiversity of floodplain river ecosystems: ecotones and connectivity, *Regulated Rivers: Research and Management*, (15), pp. 125–139.

Williams, G. & Wolman, M., 1984. Downstream effects of dams on alluvial rivers, *Geological survey professional*, pp.1286.

Wolman, M.G. et al., 1967. A cycle of sedimentation and erosion in urban river channels. *Geografiska Annaler*, (49), pp. 385–395.

World Commission on Dams (WCD), 2013. Power-Hungry Brazil Builds Dams, and More Dams, Across the Amazon, *Washington Post*, pp.4

Wyrick, J.R., Pasternack, G.B., 2014. Geospatial organization of fluvial landforms in a gravel–cobble river: Beyond the riffle–pool couplet, *Geomorphology*, (213), pp. 48-65.

Yu Yonggui, Shi Xuefa, Wang Houjie, Yue Chengkun, Chen Shenliang, Liu Yangguang, Hu Limin, Qiao Shuqing, 2013. Effects of dams on water and sediment delivery to the sea by the Huanghe (Yellow River): The special role of Water-Sediment Modulation, *Anthropocene*, (3), pp. 72-82

ANEXO 1:

ESTACIONES HIDROMETRICAS SOBRE EL RÍO SINÚ

1. Curvas hidrométricas sobre el río Sinú.

La empresa URRRA S.A y el IDEAM, han instalado estaciones limnimétricas localizadas a lo largo del río Sinú. La Tabla 1, indica las estaciones localizadas en el área de estudio:

Tabla 32. Estaciones hidrométricas en el área de estudio sobre el río Sinú.

No.	Estación	Distancia Acumulada	Cota Cero	Limnómetro
			(m.s.n.m)	
1	Puente Pacheco	0	69	Urrá S.A.
2	Santa Ana	5	67.39	Urrá S.A.
3	Pasacaballos	10.97	60.45	IDEAM
4	El Toro	24.37	52.24	Urrá S.A.
5	Carrizola	36.31	43.25	IDEAM
6	Tierralta	44.53	41.08	Urrá S.A.
7	Rio nuevo	62.56	36.13	Urrá S.A.

Con base en aforos líquidos realizados por la empresa Urra S.A, se establecen las curvas de calibración hidrométricas para las estaciones ubicadas en la zona de estudio. La Figura 1, indica la curva de calibración para la estación Puente Pacheco, la obtención de los datos de nivel y caudal se realiza a través de unas instalaciones fijas situadas a lo largo del río Sinú y son denominadas estaciones de aforo y/o monitoreo, los datos recabados en campo son introducidos a la curva para su ajuste periódico.

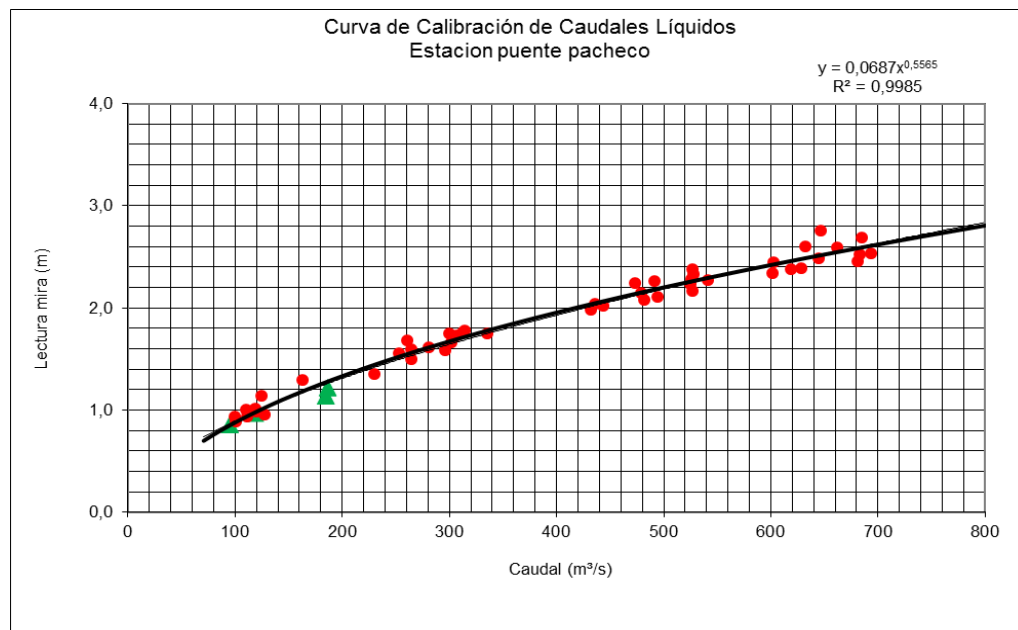


Figura 96. Curva de calibración para la estación puente pacheco.

De igual forma la Figura 2, describe la curva de calibración para la estación Santa Ana.

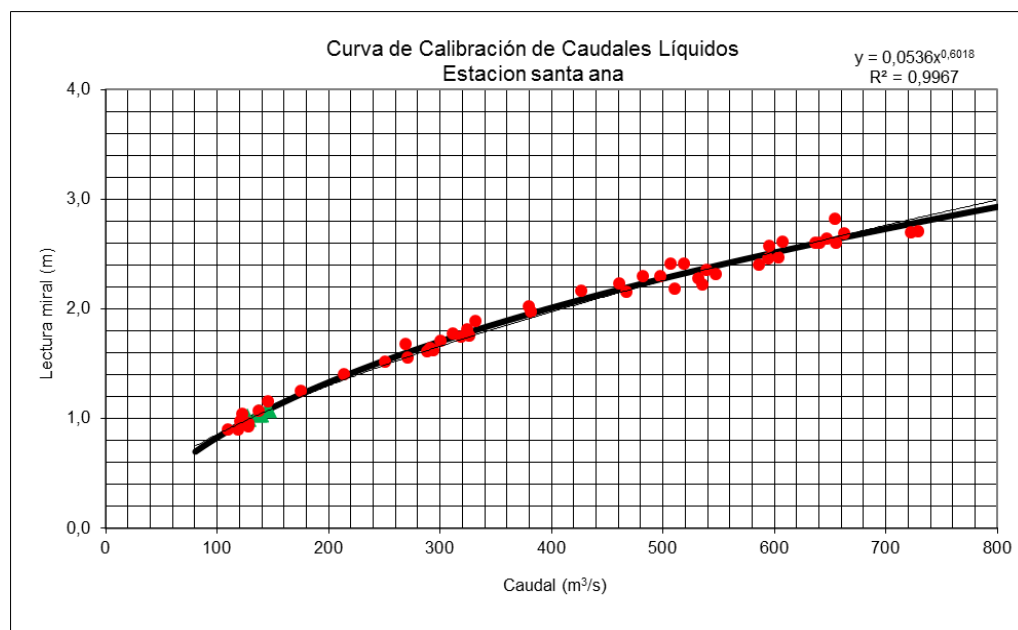
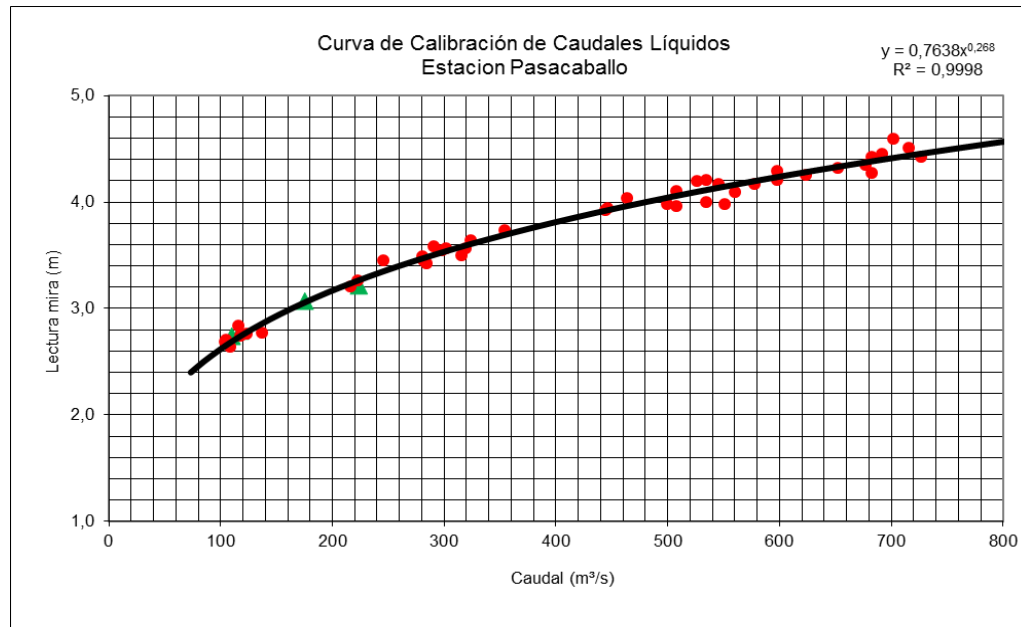


Figura 97. Curva de calibración para la estación Santa Ana.

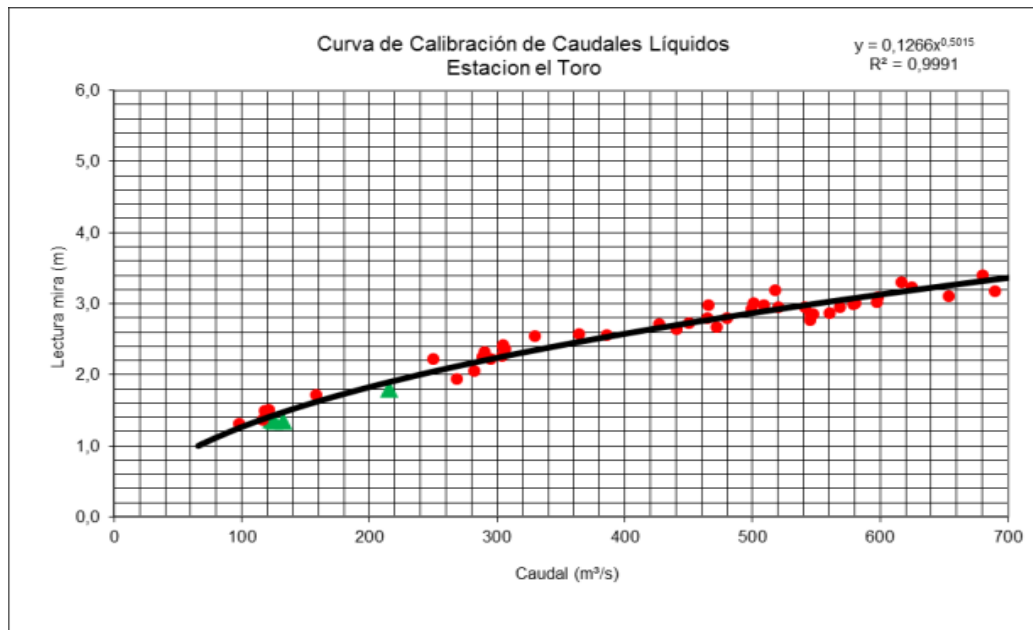
La curva de gasto es la relación que existe entre el nivel de lámina de agua y el caudal circulante en una sección de cauce determinada. La Figura 3, indica la curva de calibración H vs Q, para la estación Pasacaballo.



Fuente: Tomado de Consorcio Monitoreo del Sinú – 2013.

Figura 98. Curva de calibración para la estación Pasacaballo.

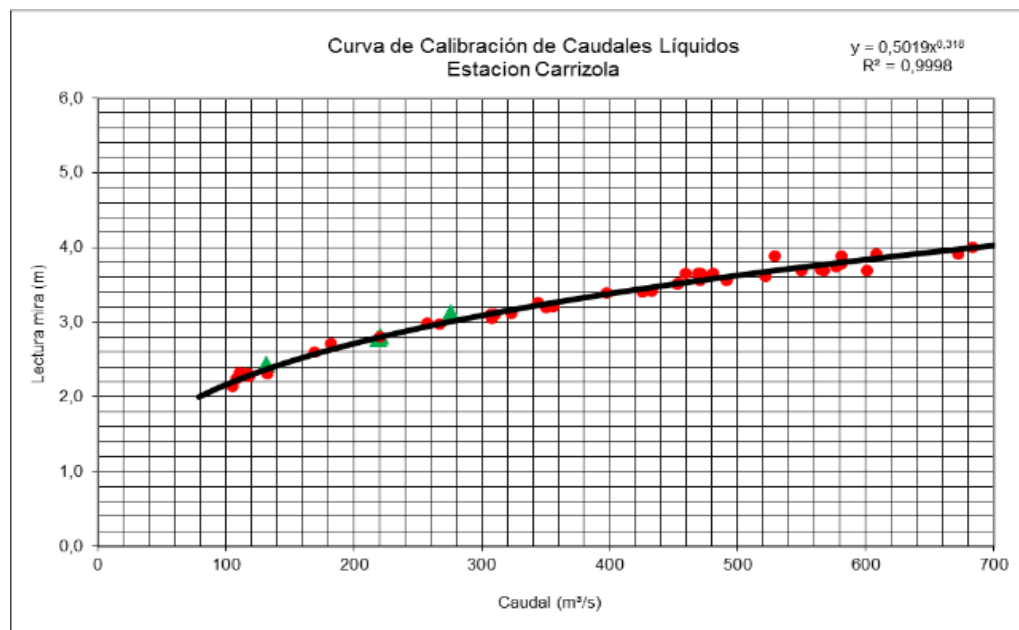
De igual forma la Figura 4, describe la curva de calibración para la estación el Toro.



Fuente: Tomado de Consorcio Monitoreo del Sinú – 2013.

Figura 99. Curva de calibración para la estación el Toro.

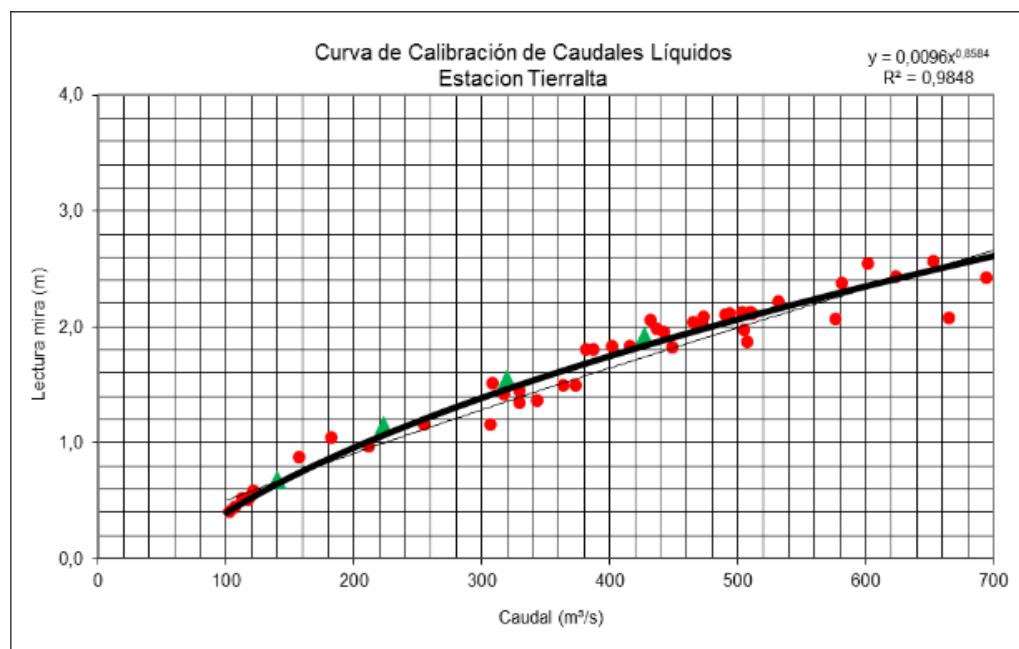
Las curvas de calibración hidrométricas, se rigen por una ley de transformación local, puesto que sólo son aplicables a los niveles de agua referidos en una escala fija situada en la sección de aforo, que permite conocer el caudal circulante asociado a cada altura. En la Figura 5, se observa la curva de calibración H vs Q, para la estación Carrizola.



Fuente: Tomado de Consorcio Monitoreo del Sinú – 2013.

Figura 100. Curva de calibración para la estación Carrizola.

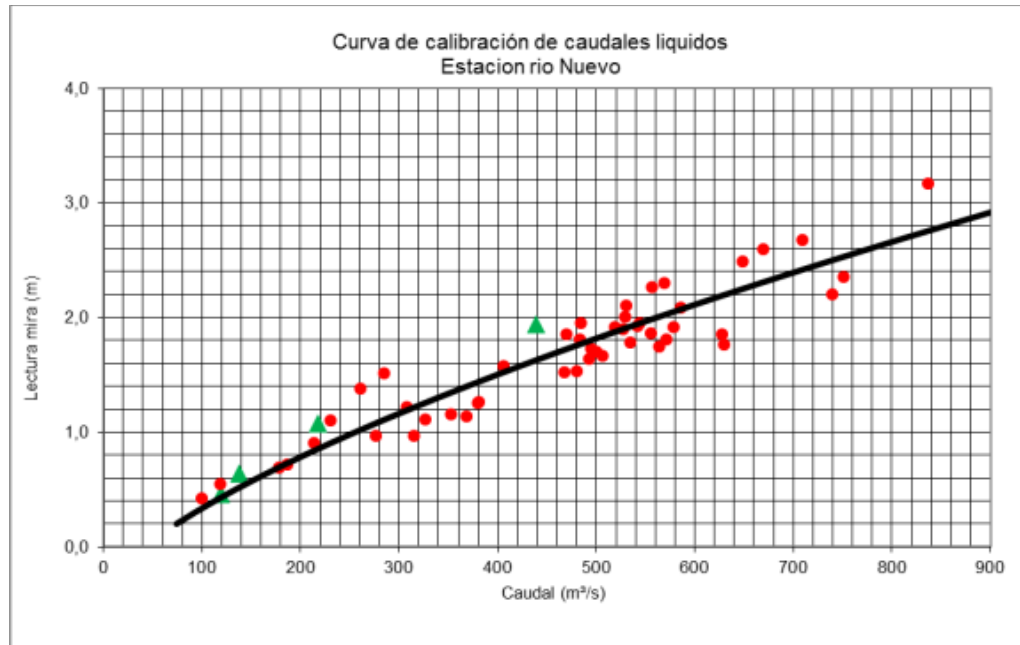
La curva de calibración de caudales para la estación Tierralta, se aprecia en la Figura 6.



Fuente: Tomado de Consorcio Monitoreo del Sinú – 2013.

Figura 101. Curva de calibración para la estación Tierralta.

De igual forma la Figura 7, describe la curva de calibración para la estación río Nuevo.



Fuente: Tomado de Consorcio Monitoreo del Sinú – 2012.

Figura 102. Curva de calibración para la estación río Nuevo.

La aplicación de la curva de remanso para el área de estudio, corresponde a condiciones uniformes de caudal constante y no incluye el tránsito de la creciente. En la Figura 8, se observa la curva de remanso para diferentes caudales, calculada con base en las curvas de calibración y los ceros de las estaciones limnimétricas.

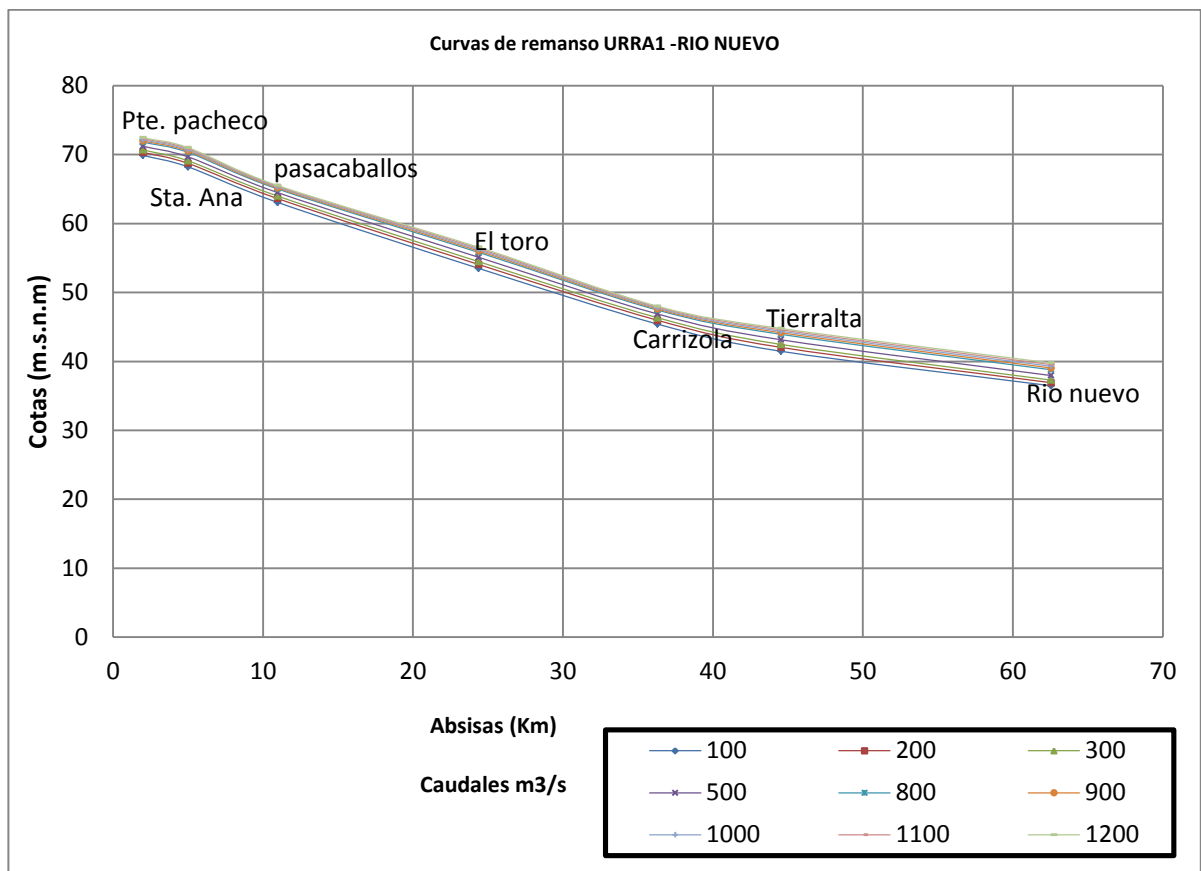


Figura 103. Curva de remanso Urra –río nuevo.

Los niveles en las estaciones limnimetricas, se encuentran influenciados por la operación de la represa de Urra y varían en función de la demanda energética que exige el país, en un rango de 0.5 m y 4.2 m.

ANEXO 2:

TUTORIA SOFTWARE

MEANDER®

1. Caracterización de la forma en planta.

Para la caracterización geométrica del río a través del software MEANDER, inicialmente ingresamos a la interfaz gráfica de usuario, donde se asocian datos generales del proyecto, tales como: Nombre del proyecto, periodo de análisis, método y una breve descripción del proyecto. En la Figura 1, se ilustra la interfaz que presenta el software MEANDER, todas las funciones del programa se pueden acceder con ayuda del menú de comandos desplegados en la parte superior o través de los botones de funciones.

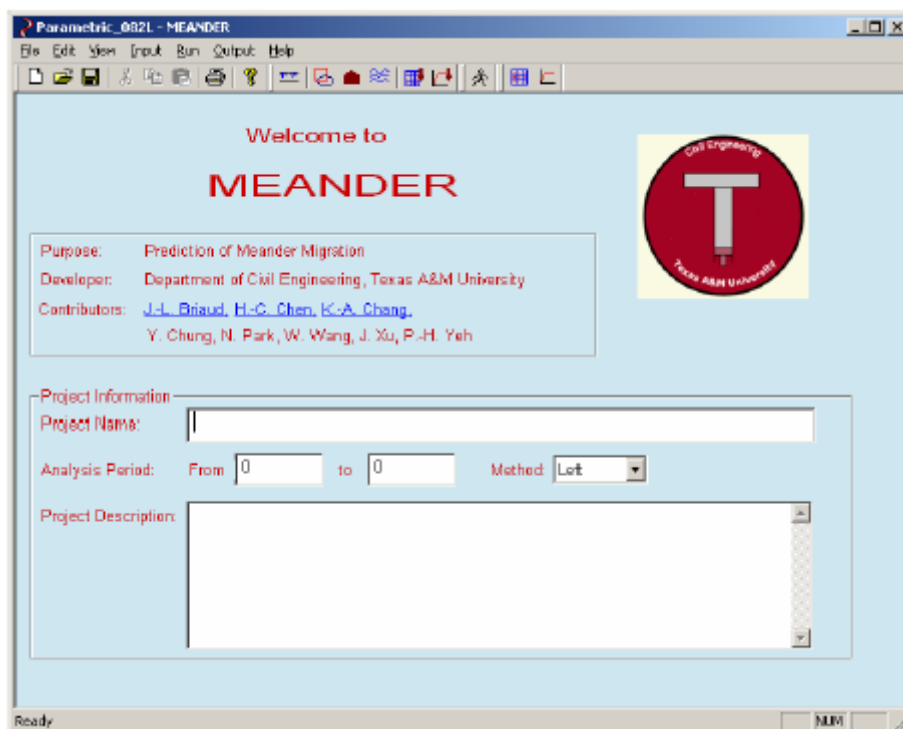


Figura 104. Interface principal del programa MEANDER.

En el software MEANDER los botones de funciones ubicados de izquierda a derecha corresponden a estas interfaces: unidades, datos geométricos, datos de suelo, datos de agua, datos en tabla, datos en gráfica, ejecutar funciones y salida de datos.

El primer paso, consiste en registrar el sistema de unidades con el cual se desea trabajar, existen dos sistemas: el métrico y el inglés, dependiendo del sistema de medición de datos, se elige entre las dos opciones. En la Figura 2, se observa la interface de unidades, con la cual se elige el sistema que se desea trabajar.

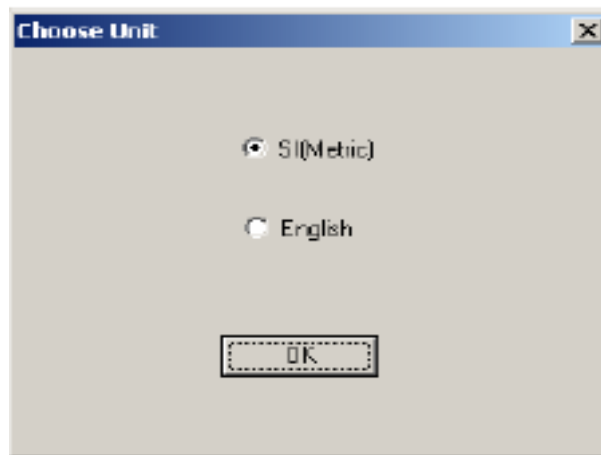


Figura 105. Interface para seleccionar sistema de unidades.

El segundo paso, consiste en ingresar los datos para la caracterización geométrica del cauce, para lo cual se selecciona el archivo que contiene las coordenadas del río, el archivo de coordenadas se obtiene a través de la digitalización de imágenes satelitales del río, este procedimiento se puede realizar con ayuda de un programa SIG, tal como se observa en la Figura 3.

Antes de establecer la línea de ajuste a la curva, se definen datos generales como el ancho promedio del cauce, para el río Sinú el valor se encuentra en un rango de 100 y 120 m, la línea central es dividida en varios segmentos, la relación entre la distancia de dos puntos adyacentes y el ancho del cauce se conoce como *coeficiente de espaciamento*, los valores utilizados para este parámetro oscilan entre 2 y 3.

La longitud del segmento es la longitud que se usa para calcular el radio de curvatura a partir del punto medio. El *coeficiente de la longitud del segmento*, es la relación de la longitud del segmento y la anchura del río, para el caso del río Sinú los valores son mayores de 10.

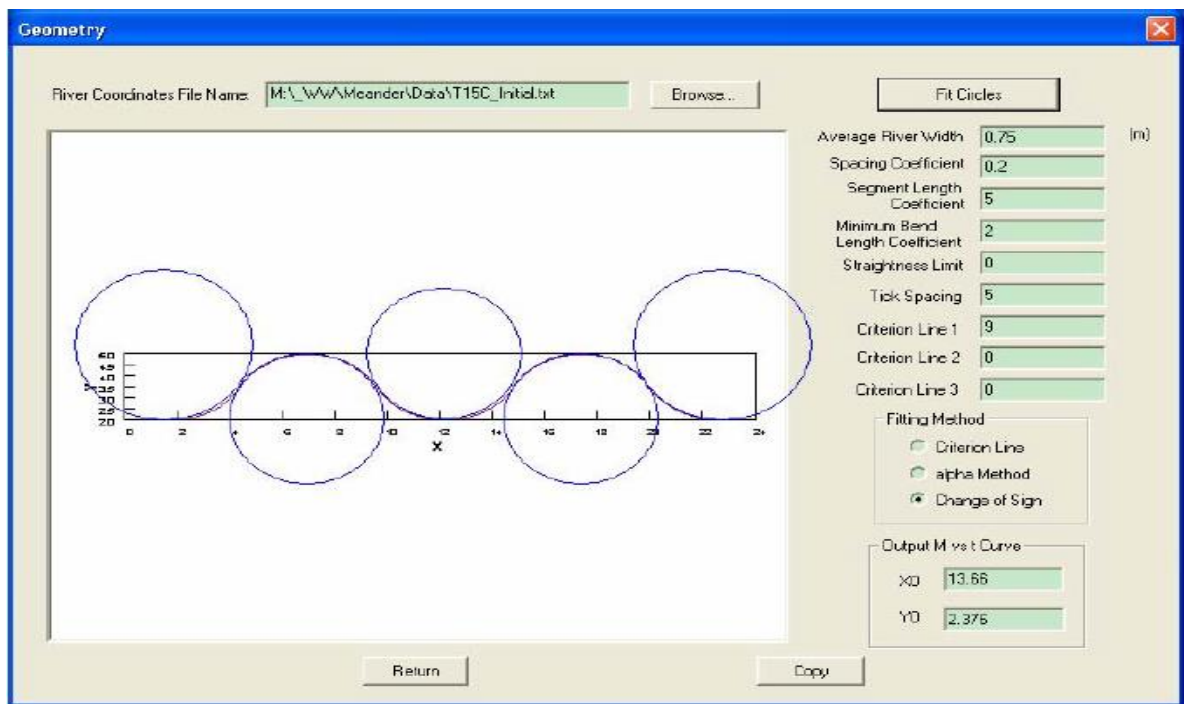


Figura 106. Interface para ingresar datos geométricos.

Cuando existen curvas muy pequeñas se generan ciertas dificultades al generar un círculo en estas curvaturas, para estos casos, se establece el coeficiente mínimo para la longitud de curvatura, que es la relación entre la longitud de curvatura mínima y el ancho del cauce, el valor sugerido es 2, entre más pequeño son los valores, más curvaturas son generadas en el cauce.

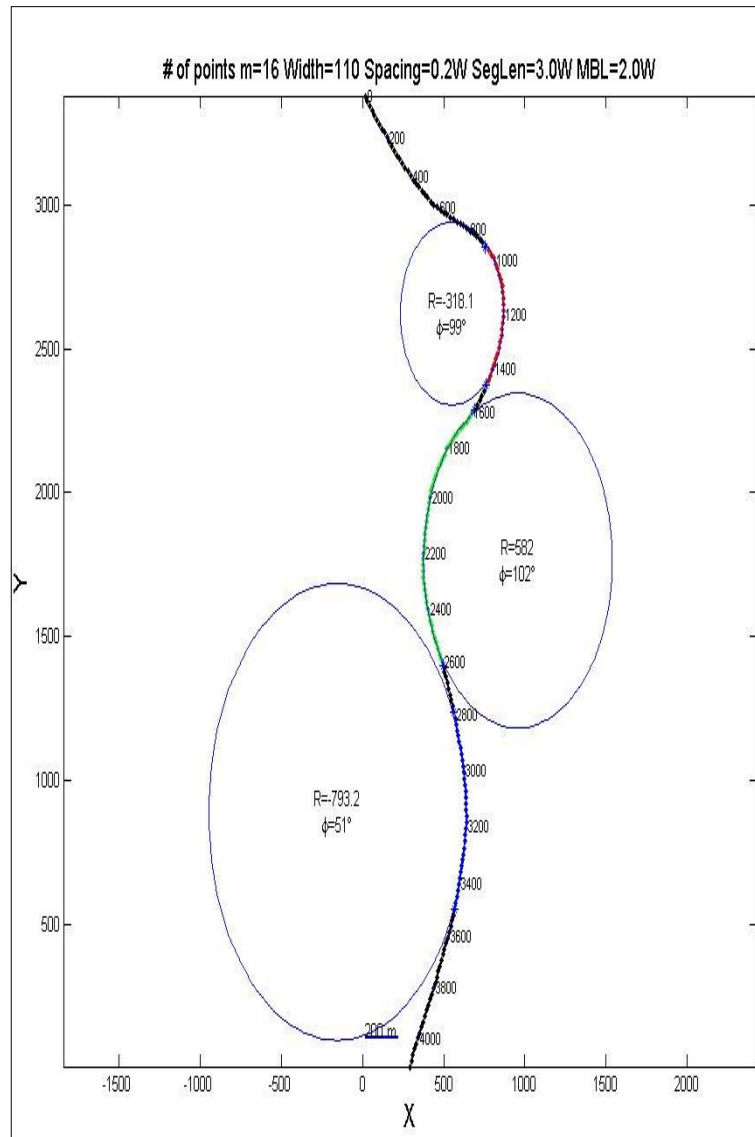
Los valores para la línea de criterio, tienen por defecto valores de 0 y pueden darse solo a partir de la experticia con el modelo, los valores X_0 y Y_0 , corresponden a un punto desde el cual se puede evaluar la migración lateral, el valor por defecto es 0.

Finalmente, con ayuda de la función “fit circles” se introduce una pre-visualización de las circunferencias que mejor ajustan a las curvas del meandro.

- **Ajuste de curvas**

El software MEANDER una vez es ejecutada la función “Run”, genera unas figuras en formato MATLAB, en la cual se visualizara el mejor ajuste de una circunferencia (por efecto del software los círculos generados, se ven como elipses, pero son

circunferencias) a las distintas curvaturas que presenta el río, tal como se indica en la Figura 4.



Fuente: Briaud, 2005

Figura 107. Ajuste geométrico de curvas con software MEANDER.

- **Migración lateral.**

En la Figura 5, las relaciones geométricas entre el radio de curvatura y el ancho del cauce, se obtienen con ayuda del software *MEANDER* en formato MATLAB. Para cada forma en planta del río Sinú, se promedian los valores obtenidos de la

relación radio de curvatura y ancho de canal a lo largo de su longitud, una vez obtenidos los valores de referencia se aplicaron los métodos empíricos de Hickin y Hanson, para el cálculo de tasa de erosión en márgenes.



Fuente: Briaud ,2005

Figura 108. Caracterización de la relación radio de curvatura y ancho de canal.

Estos cálculos no tienen en cuenta las características del material del margen ni la potencia del flujo, factores ambos determinantes para conocer el mecanismo de fallo del margen, sin embargo representan un valor cuantitativo de la tasa de erosión (en m/año).

ANEXO 3:

TUTORIAL SOBRE IMÁ- GENES SATELITALES

1. Base de datos SIG del río Sinú

La información espacial se fundamentó en una investigación previa desarrollada por la Universidad del Norte en el año 2005. En la cual, se realizó un análisis con las fotografías aéreas e imágenes satelitales tipo Landsat de la zona en estudio, (IDEHA, 2005).

Con el objeto de indagar, si toda la información geográfica disponible fue objeto del análisis realizado por la universidad del Norte, se verificó la información geográfica de la zona en estudio, en el Banco Nacional de Imágenes-BNI, adscrito al Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

Al consultar la base cartográfica IGAC en el periodo pre-embalse (1962-1994), se observó que la información cartográfica disponible consta de varias fotografías aéreas, tal como se indica en la Tabla 1.

Tabla 33. Aerofotografías de la zona en estudio.

AÑO	FAJA VUELO	FECHA FOTOS	SOBRE	ESCALA
1945	S-9 R-4	08-XI-1945	094-0142 19	1:40.000
1945	S-7 R-2	08-XI-1945	02-010	1:40.000
1945	S-6 R-2	23-XI-1945	217-226	1:40.000
1961	255 F24 M 1134	14-XI-1961	18640-18649 883	1:60.000
1967	2 R-633	15-VI-1967	07-012 3193	1:92.000
1988	18 2355	25-VIII-1988	0134-0150 34846	1:29.600
1994	144 C2539	01-II-1994	102-114 36991	1:63.000

Fuente: IDEHA, 2005

Con posterioridad, se verifica la información satelital disponible en bases de datos geográficos internacionales como: La Earth Science Data Interface-ESDI y la base datos satelitales de Brasil-INPE, tal como lo indica la Figura 1.

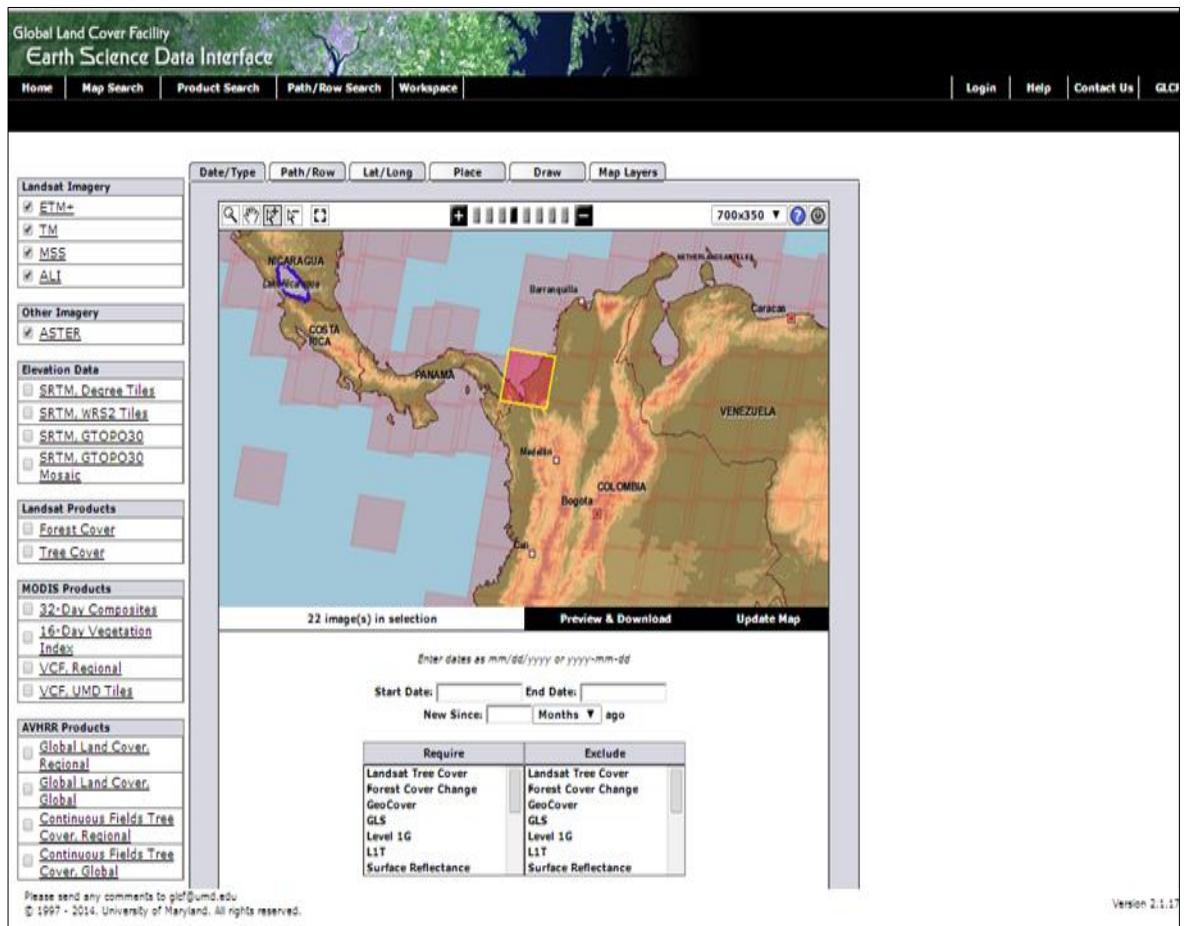


Figura 109. Base de datos satelitales- ESDI

En la Figura 2, se observa el área de estudio, sobre la cual se verificó la disponibilidad de información satelital.

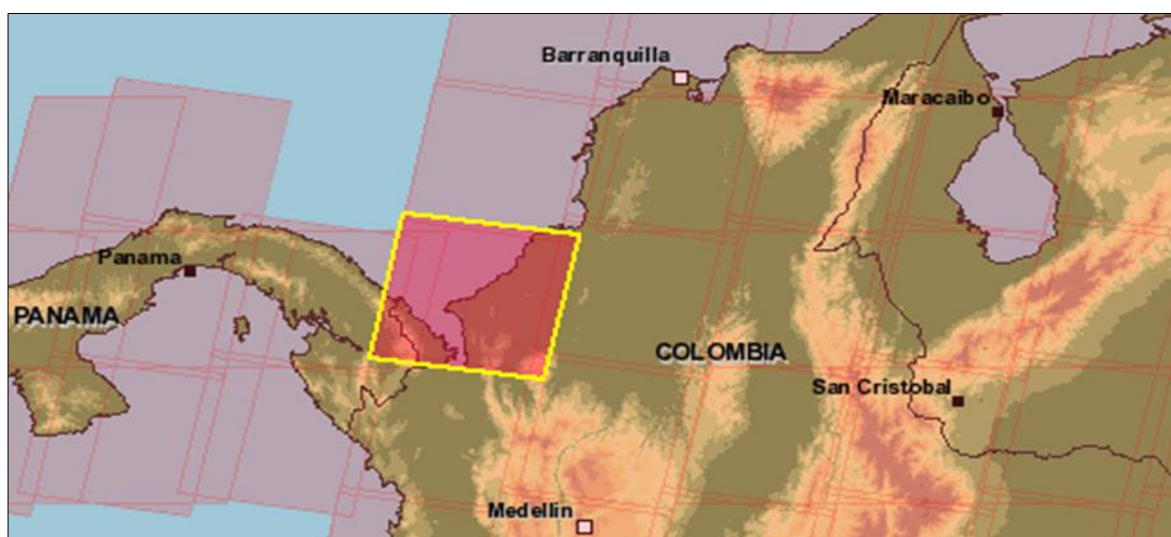


Figura 110. Localización satelital del área de estudio

La Tabla 2, indica los años para los cuales existe información satelital disponible de la zona de estudio.

Tabla 34. Información satelital disponible sobre la zona de estudio.

[ID]	Status	[WRS: P/R]	[Acq. Date]	Dataset	Producer	Type
<u>015-522</u>	Online	2: 010/054	18/10/2001	ETM+	USGS / GLCF	BSQ
<u>015-538</u>	Online	2: 010/054	10/08/1999	ETM+	USGS / GLCF	BSQ
<u>018-308</u>	Online	2: 010/054	21/03/1999	TM	EarthSat	GeoTIFF
<u>020-120</u>	Online	2: 010/054	21/03/1991	TM	USGS	BSQ
<u>034-477</u>	Online	2: 010/054	25/11/2003	ETM+	USGS	GeoTIFF
<u>042-454</u>	Online	2: 010/054	04/02/2001	ETM+	EarthSat	GeoTIFF
<u>073-239</u>	Online	2: 010/054	08/09/2004	ETM+	USGS	GeoTIFF
<u>074-590</u>	Online	2: 010/054	13/10/2005	ETM+	USGS	GeoTIFF
<u>080-090</u>	Online	2: 010/054	04/01/2007	ETM+	USGS	GeoTIFF
<u>199-691</u>	Online	2: 010/054	21/03/1991	TM	USGS	GeoTIFF
<u>207-081</u>	Online	2: 010/054	04/02/2001	ETM+	USGS	GeoTIFF
<u>215-826</u>	Online	2: 010/054	27/09/2005	ETM+	USGS	GeoTIFF
<u>215-827</u>	Online	2: 010/054	01/01/2006	ETM+	USGS	GeoTIFF
<u>233-512</u>	Online	2: 010/054	21/03/1991	TM	USGS	GeoTIFF
<u>238-100</u>	Replaced	2: 010/054	04/02/2001	ETM+	GLCF	GeoTIFF
<u>246-976</u>	Replaced	2: 010/054	27/09/2005	ETM+	GLCF	GeoTIFF
<u>246-977</u>	Replaced	2: 010/054	01/01/2006	ETM+	GLCF	GeoTIFF
<u>264-049</u>	Online	2: 010/054	04/02/2001	ETM+	GLCF	GeoTIFF
<u>272-925</u>	Online	2: 010/054	27/09/2005	ETM+	GLCF	GeoTIFF
<u>272-926</u>	Online	2: 010/054	01/01/2006	ETM+	GLCF	GeoTIFF
<u>293-857</u>	Online	2: 010/054	09/11/2009	ETM+	USGS	GeoTIFF
<u>293-858</u>	Online	2: 010/054	11/12/2009	ETM+	USGS	GeoTIFF

Sin embargo, algunas imágenes satelitales tipo Landsat se descartaron por presentar alta nubosidad y generar distorsión en la definición del meandro, tal como lo indica la Figura 3.

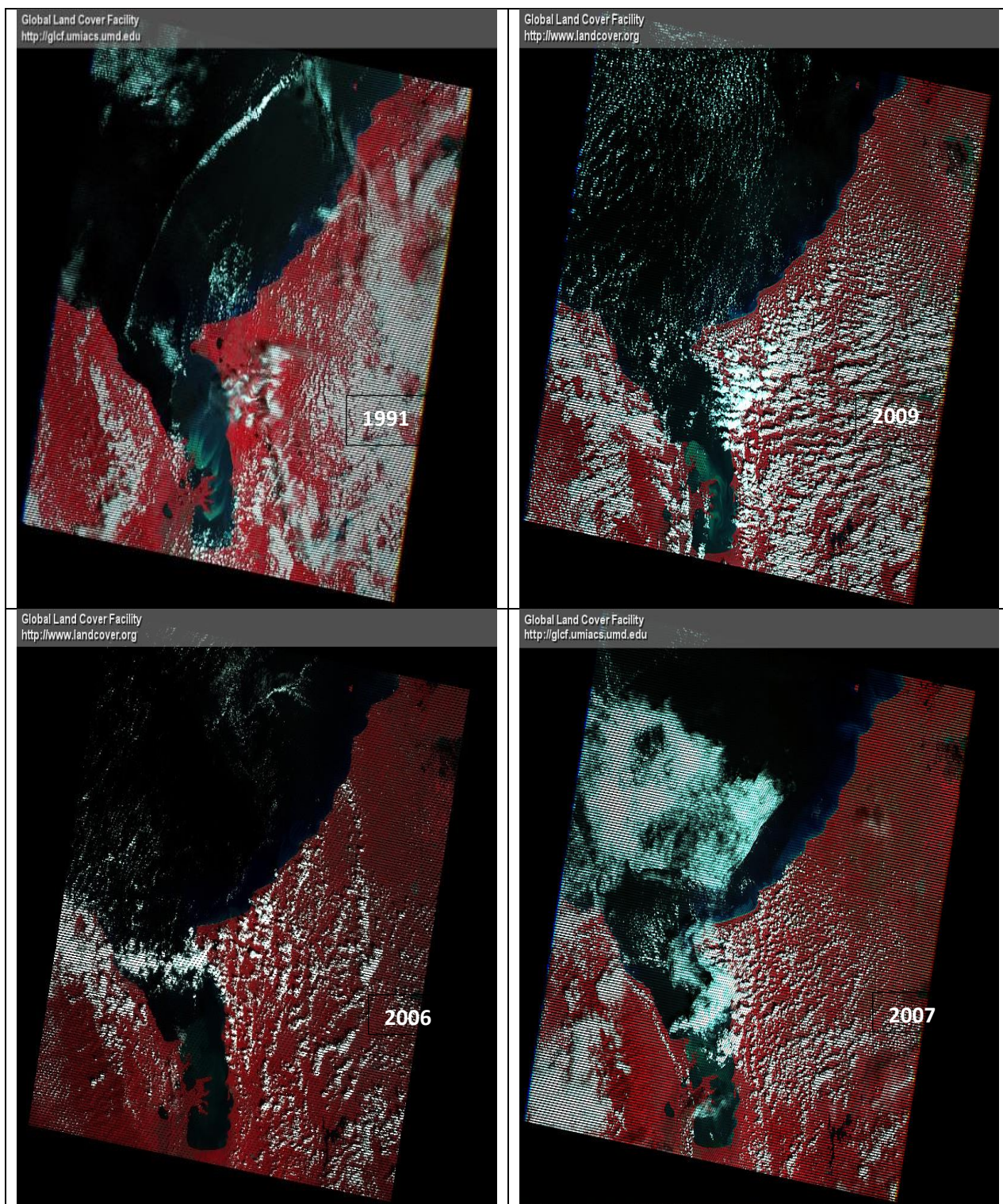


Figura 111. Mosaico de imágenes tipo Landsat con alta nubosidad sobre área de estudio

Finalmente, se analizaron las imágenes tipo Landsat de mejor resolución (menor nubosidad) mediante la interpretación de las orillas, la superposición de los cauces parciales-totales del río Sinú y la envolvente de las líneas de orillas de los cauces en un SIG, estableciendo la forma en planta del río Sinú para los años 1961, 1981, 1988, 1994, 1999, 2002, 2004 y 2005.

ANEXO 4:
INDICADORES DE CAM-
BIO HIDROLOGICO RÍO
SINÚ (1960-2005)

1. Indicadores de cambio hidrológico para el río Sinú (1962-1981).

En este periodo de tiempo el comportamiento hidrológico, se enmarca en variaciones sobre los registros de caudal para el río Sinú, por efecto de fenómenos macro climáticos ENSO. La Figura 1, indica la serie de tiempo del río Sinú para el periodo (1962-1988), se observa que la condición dominante son los flujos de caudal medio y bajos, la media en los registros de caudales es de $350 \text{ m}^3/\text{s}$. Sin embargo, las fluctuaciones en los pulsos de caudal van desde los $1800 \text{ m}^3/\text{s}$ a $36 \text{ m}^3/\text{s}$, esta es la condición de caudal dominante en la mayoría de los ríos naturales no intervenidos, en los cuales después de un evento de precipitación y por efecto de la escorrentía de superficie el río aumenta súbitamente su nivel, creando pequeñas inundaciones que aumentan la potencia del flujo en las curvas e incrementan el potencial erosivo del río.

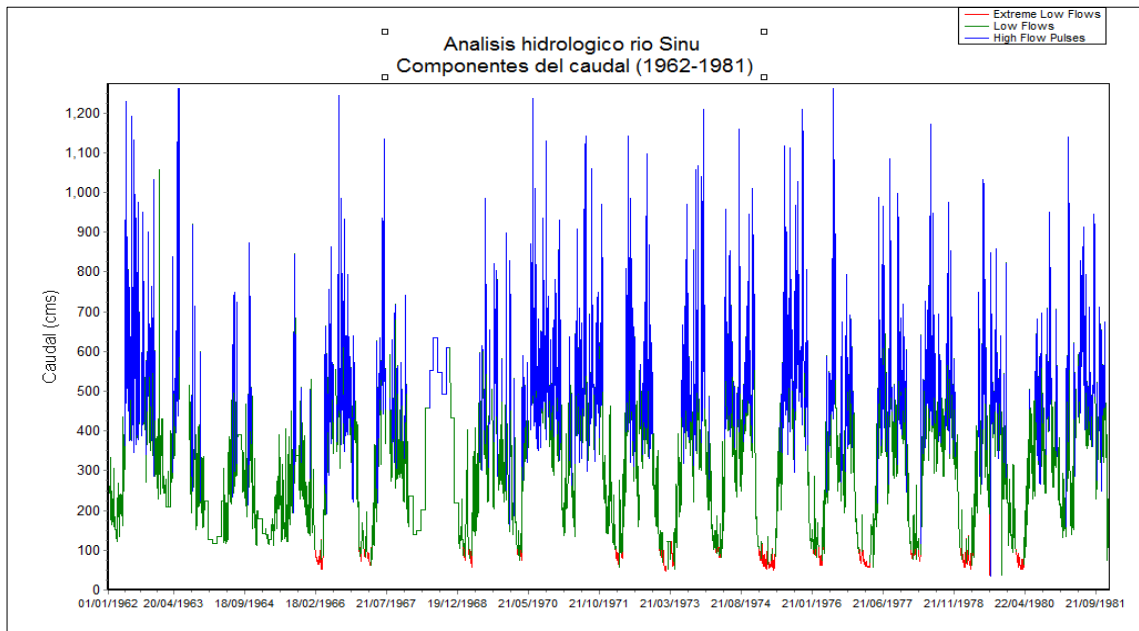


Figura 112. Comportamiento hidrológico río Sinú (1962-1981).

1.1. Pulsos de caudal altos para el río Sinú (1962-1981).

El análisis hidrológico indica que entre las décadas del 60' y 80' el río Sinú experimentó varias crecientes súbitas de caudal. En la Figura 2, se observa el comportamiento de los pulsos de caudal alto, el cual registró un total de 401 pulsos para el periodo (1962-1981), con un promedio anual de 20 pulsos de caudal alto.

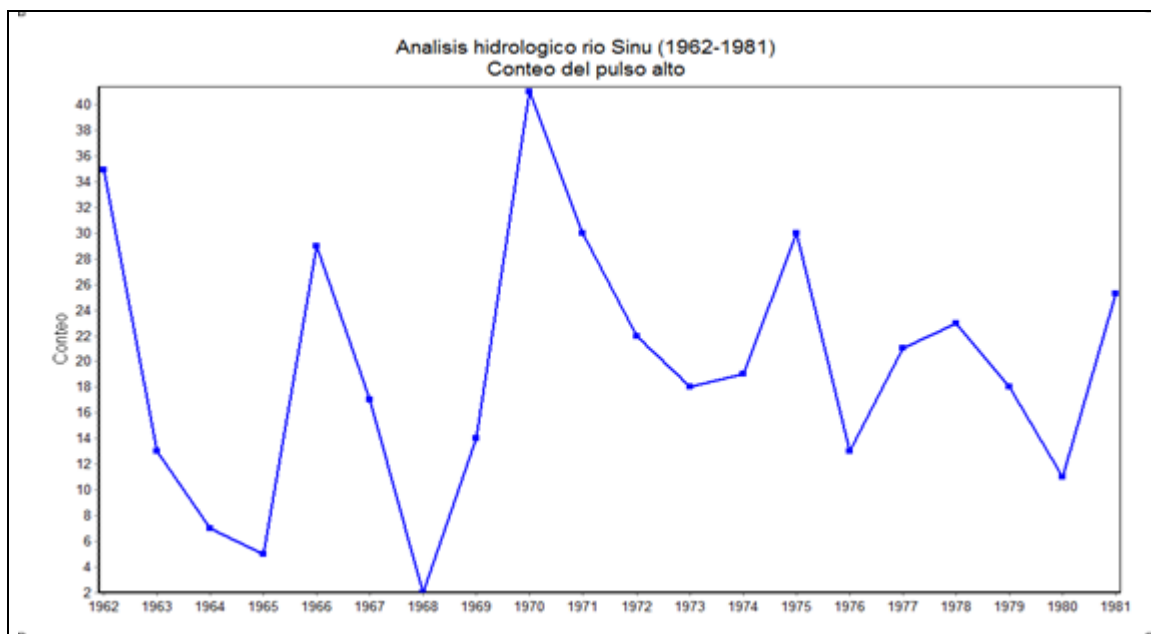


Figura 113. Conteo de pulsos altos de caudal para el río Sinú (1962-1981).

Los registros hidrológicos indican una tendencia estable en la duración de los pulsos de caudal alto, con un promedio de 3 días para el periodo hidrológico evaluado, tal como se observa en la Figura 3.

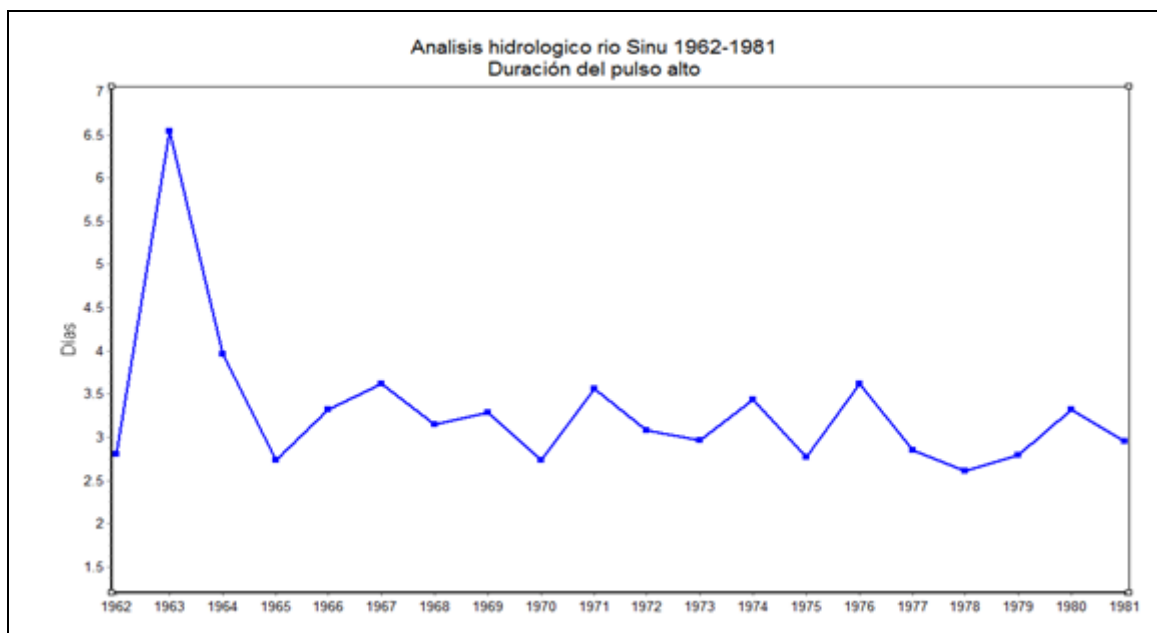


Figura 114. Duración de los pulsos altos de caudal para el río Sinú (1962-1981).

1.2. Tasas de variación de caudal (1962-1981)

La variabilidad en el régimen de caudales para el río Sinú se determina por medio de las tasas de ascenso y descenso de caudal. En la Figura 4, se observan las tasas de ascenso de caudal con valores anuales que oscilan entre los 130 m³/s y 70 m³/s al día, la media anual para el periodo hidrológico (1962-1981) es de 95.5 m³/s al día.

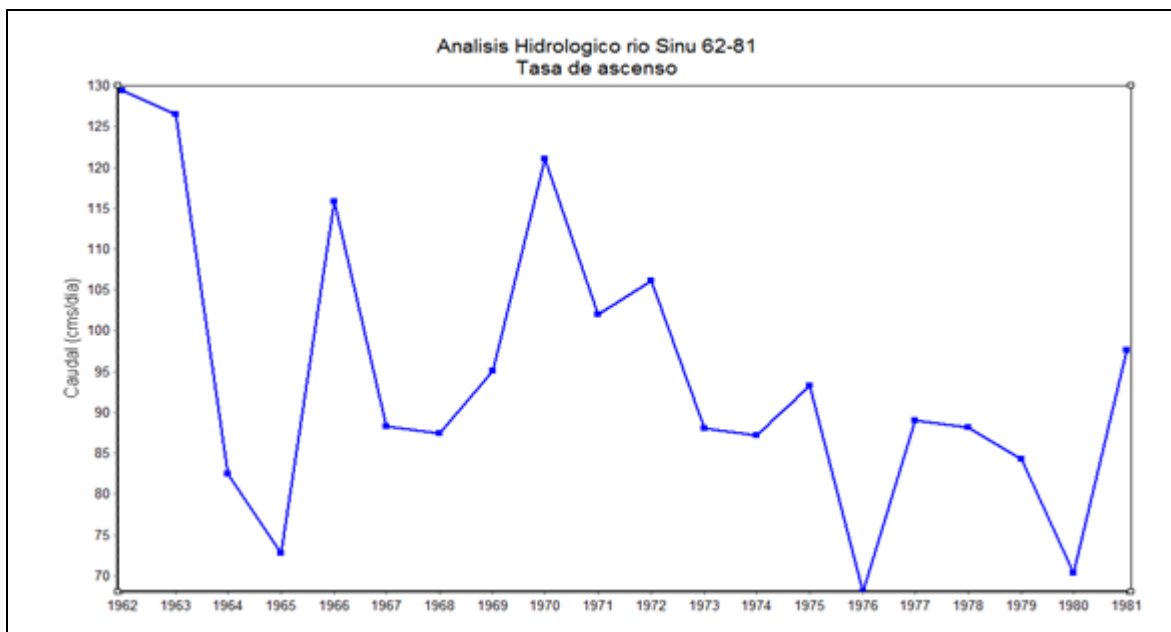


Figura 115. Tasas de ascenso para el caudal del río Sinú (1962-1981).

Un comportamiento similar, registran las tasas de descenso con valores de promedio anual en 66.5 m³/s al día, tal como se observa en la Figura 5.

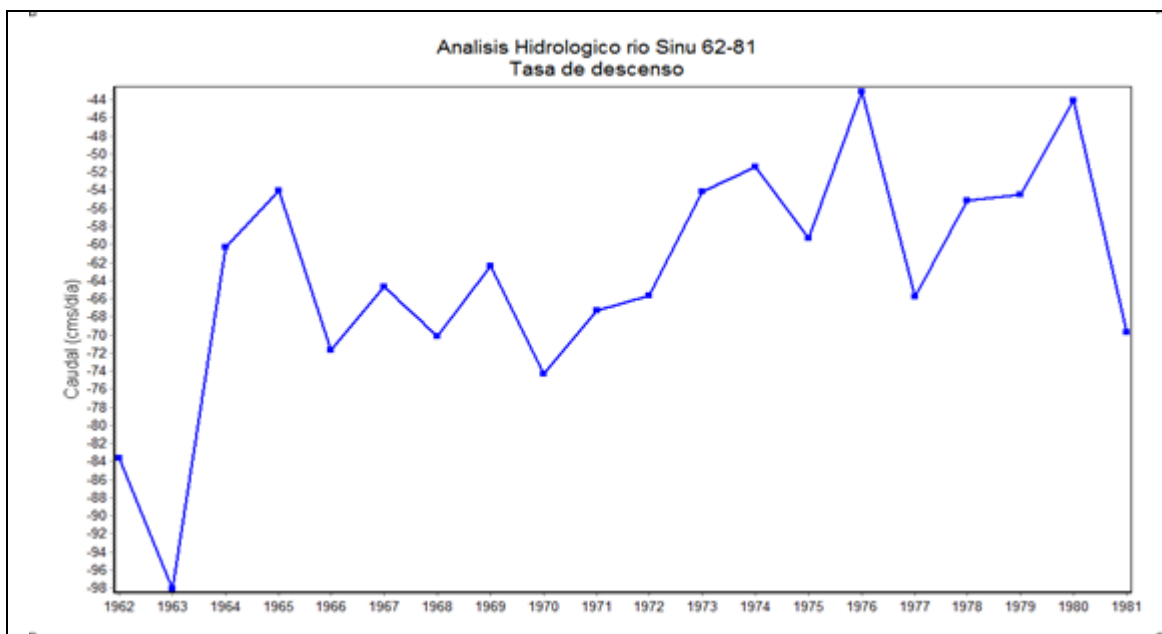


Figura 116. Tasas de descenso para el caudal del río Sinú (1962-1981).

2. Indicadores de cambio hidrológico para el río Sinú (1982-1988).

La serie de tiempo de caudales para el periodo hidrológico (1982-1988), presenta bajos caudales para los primeros meses de cada año. En la Figura 6, se indican los valores de caudal mínimo para los periodos de estiaje, los cuales oscilan entre los $36 \text{ m}^3/\text{s}$ y $335 \text{ m}^3/\text{s}$. A partir del mes de mayo hasta el mes de noviembre, se presenta un incremento en los registros de caudal por efecto de la temporada invernal, los valores para este periodo van desde los $335 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta $450 \text{ m}^3/\text{s}$.

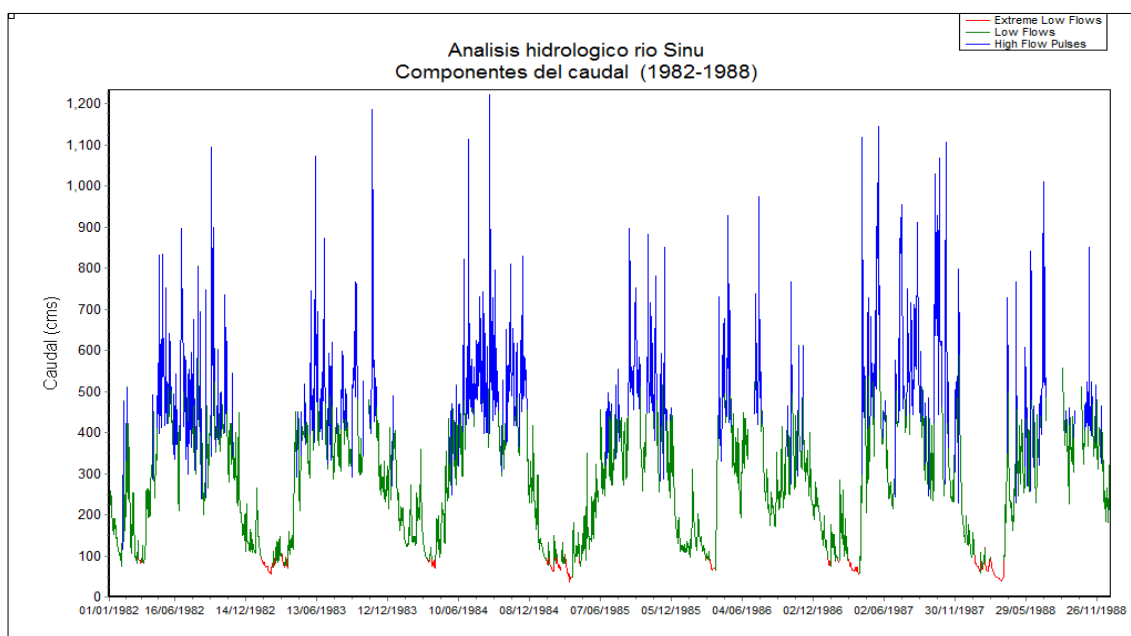


Figura 117. Análisis hidrológico para el río Sinú (1982-1988).

2.1. Pulsos de caudal altos para el río Sinú (1982-1988).

Las pequeñas inundaciones se presentan cuando los caudales máximos, superan el caudal medio diario, estas crecientes súbitas son las que modelan las características físicas del cauce. La Figura 7, indica que en el periodo hidrológico (1982-1988) se presentaron 135 pulsos de caudal alto, con un promedio anual de 19 pulsos.

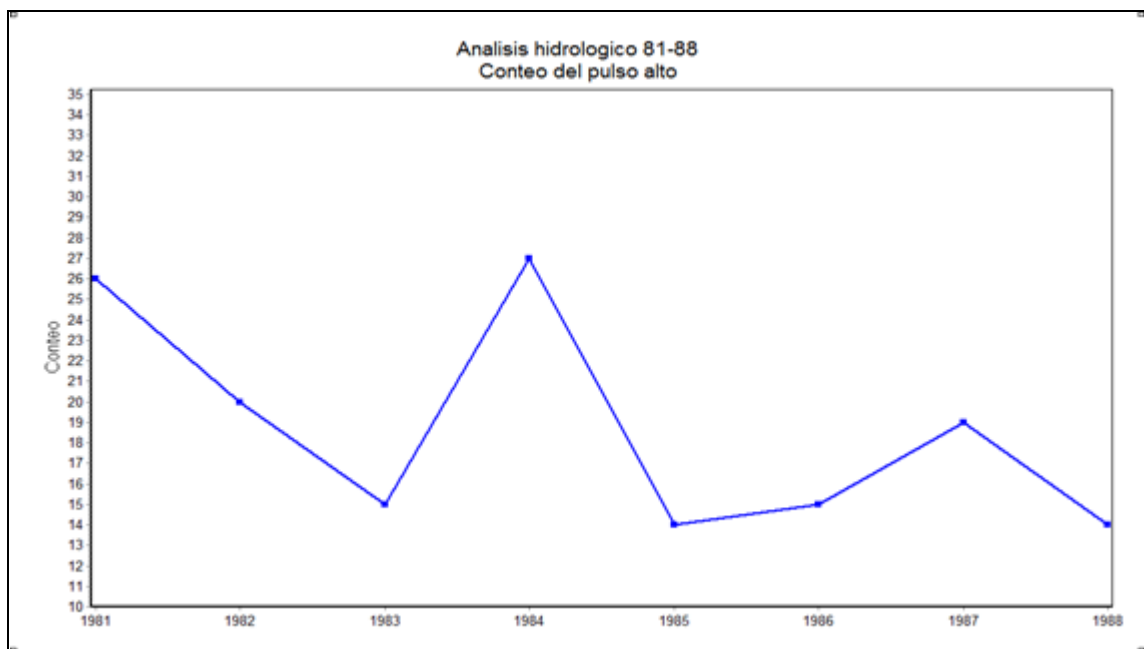


Figura 118. Pulsos altos de caudal para el río Sinú (1982-1988).

Los registros hidrológicos indican una tendencia estable en la duración de los pulsos de caudal alto, con un promedio de 3,41 días para el periodo hidrológico evaluado, tal como se observa en la Figura 8.

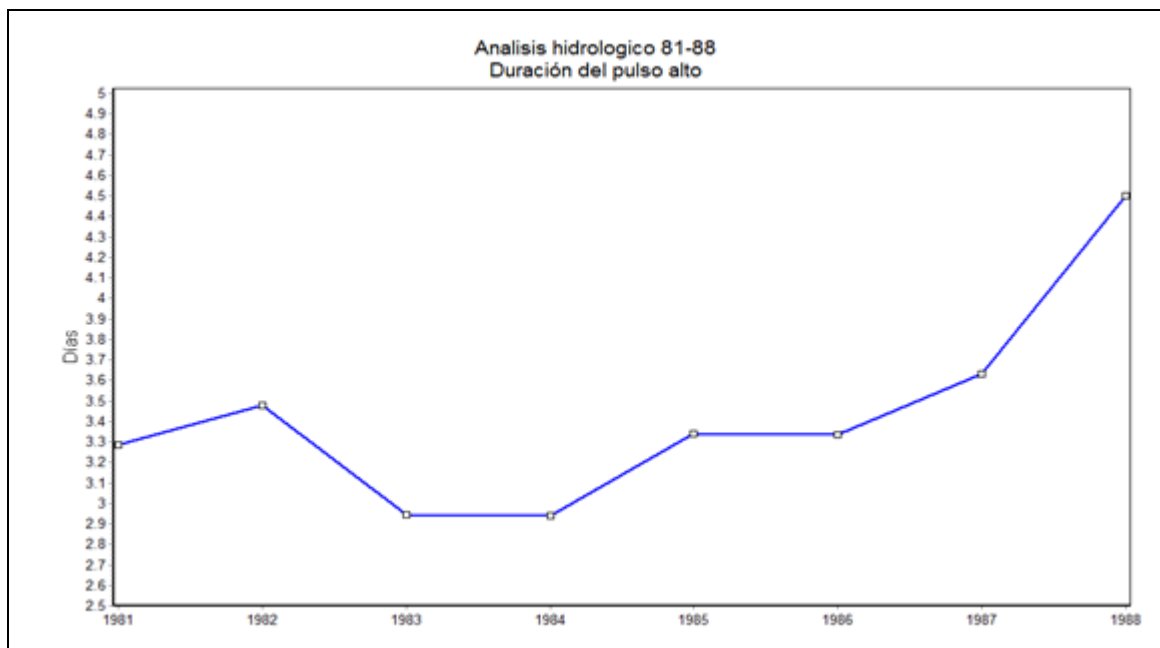


Figura 119. Duración de los pulsos altos de caudal para el río Sinú (1982-1988).

2.2. Tasas de variación de caudal (1981-1988)

Las tasas de ascenso de caudales tienen un promedio anual de $86 \text{ m}^3/\text{s}$ al día, con una tendencia ascendente para finales de la década de los 80', con valores de $110 \text{ m}^3/\text{s}$ al día, tal como se indica en la Figura 9.

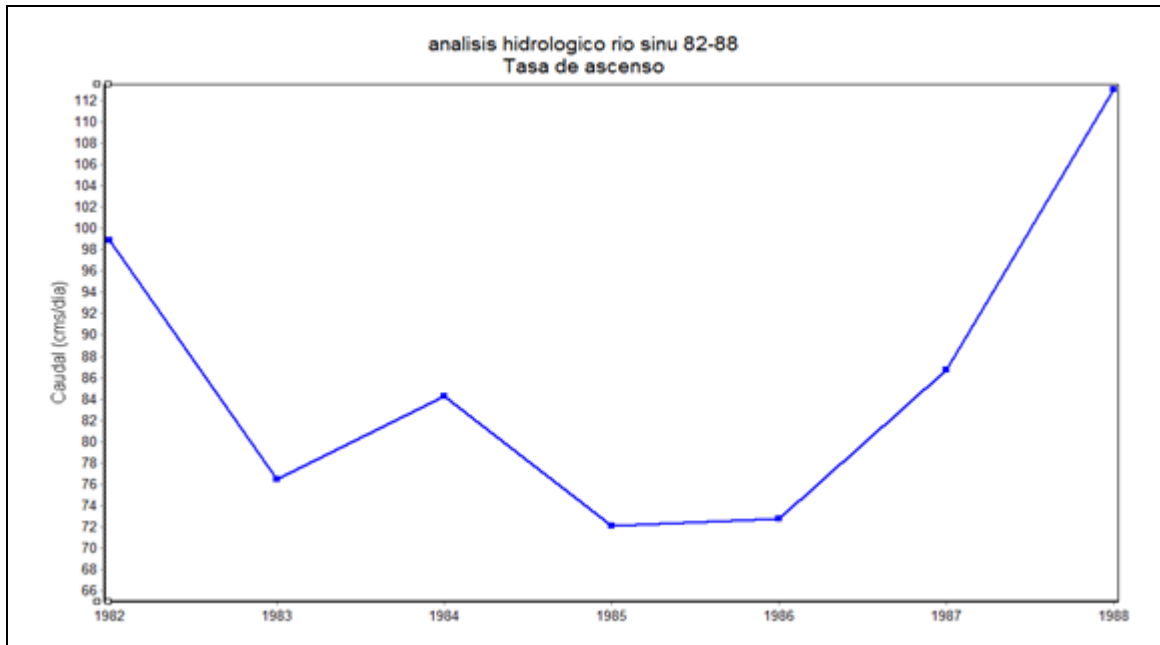


Figura 120. Tasas de ascenso para el caudal del río Sinú (1982-1988)

En las tasas de descenso de caudal para el periodo evaluado, la tendencia es descendente con una media anual de $53 \text{ m}^3/\text{s}$ al día, estas variaciones de caudal afectan directamente la migración lateral del río, pues aumentan el potencial erosivo en sus curvas

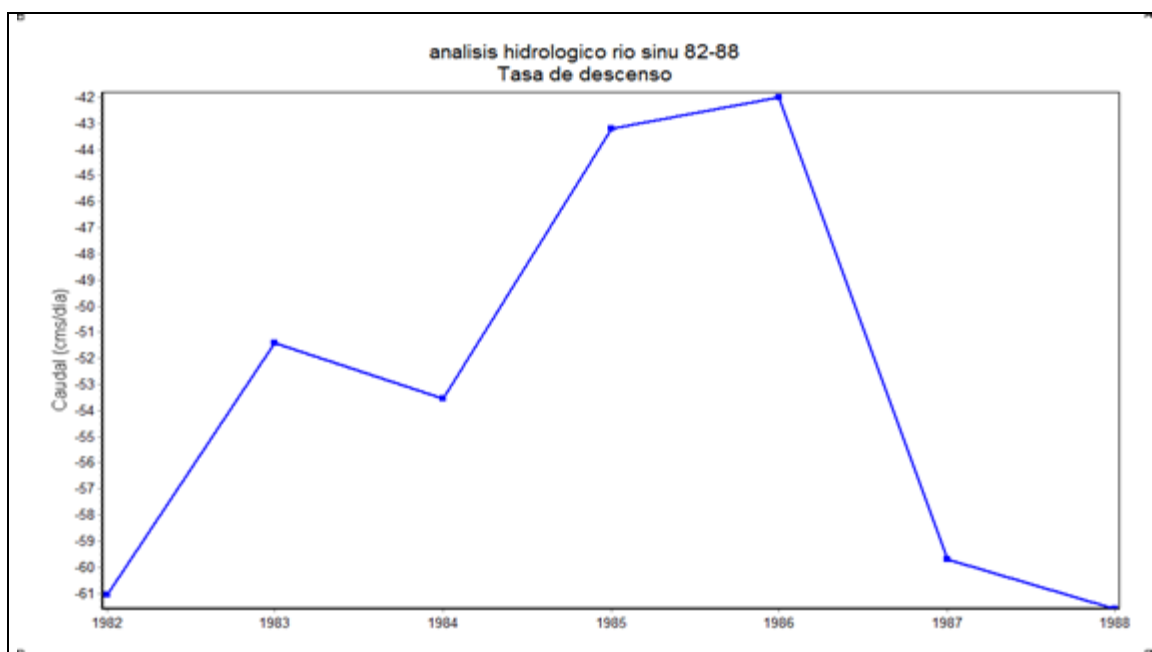


Figura 121. Tasas de descenso para el caudal del río Sinú (1982-1988).

3. Indicadores de cambio hidrológico para el río Sinú (1989-1994).

Los caudales promedio del río Sinú para el periodo (1989-1994) son de $300 \text{ m}^3/\text{s}$. La Figura 11, indica que la temporada invernal tuvo mayor intensidad en los años 1989, 1990 y 1994, con picos de caudal alto que oscilan entre los $700 \text{ m}^3/\text{s}$ y $1359 \text{ m}^3/\text{s}$. De igual forma, se observan fuertes periodos de sequía al inicio de los años 1990, 1991 y 1992.

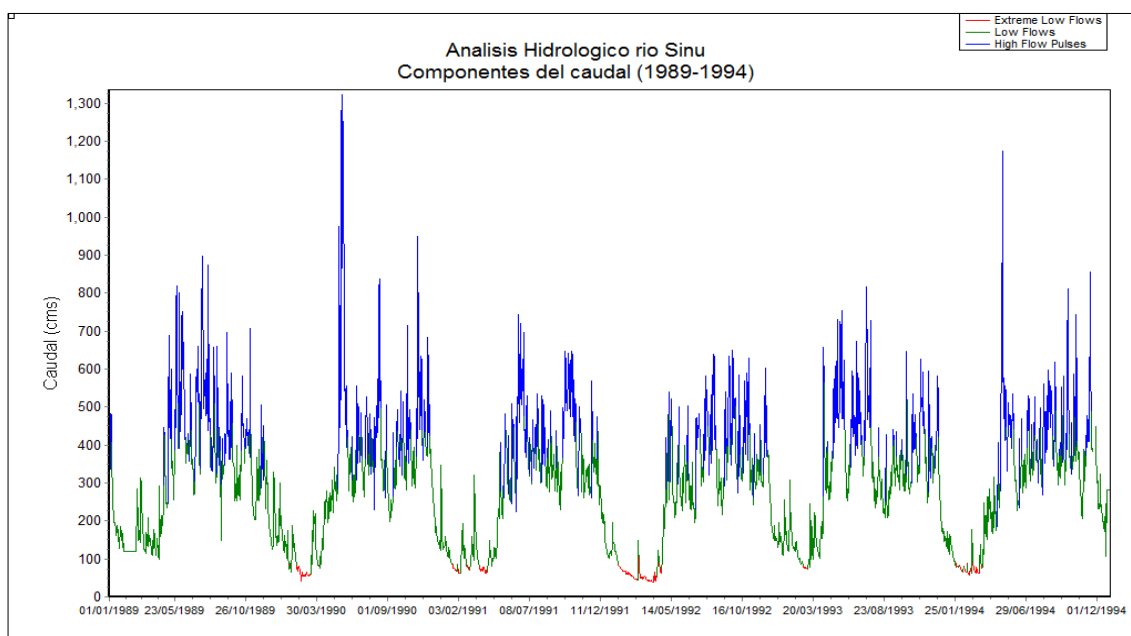


Figura 122. Análisis hidrológico para el río Sinú (1989-1994)

3.1. Pulsos altos de caudal sobre el río Sinú (1989-1994).

En el periodo hidrológico comprendido entre 1989 y 1994, se presentaron 123 pulsos de caudal alto, con un promedio anual de 21 pulsos, tal como se observa en la Figura 12.

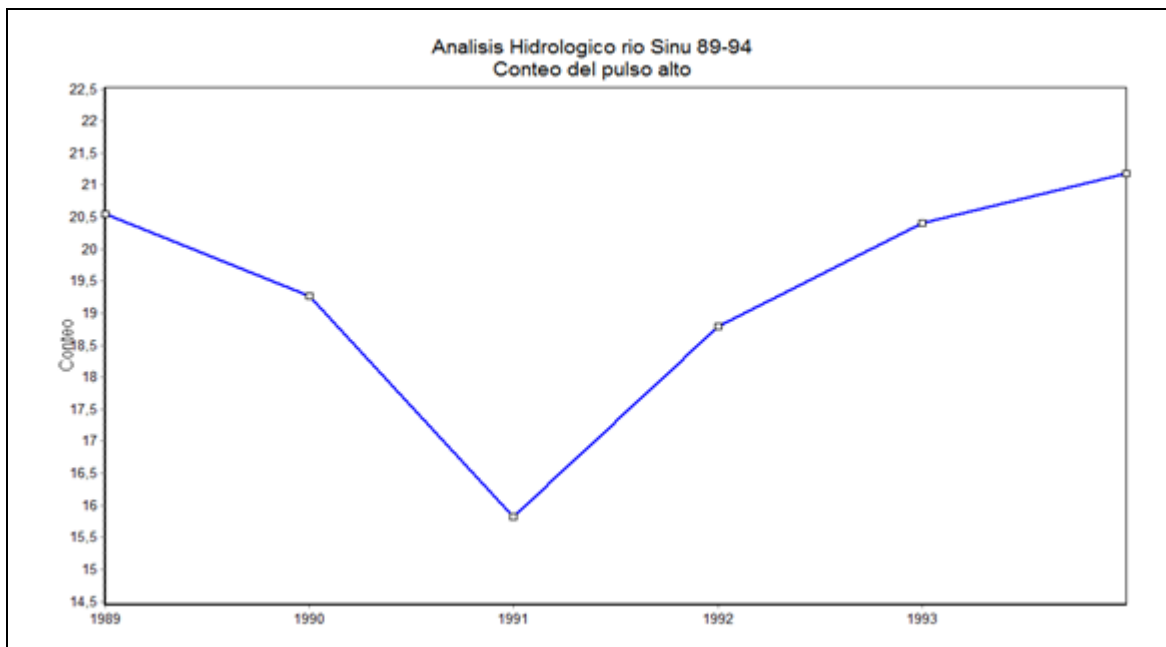


Figura 123. Pulsos altos de caudal sobre el río Sinú (1989-1994).

En la Figura 13, se observa que para el periodo evaluado los eventos hidrológicos en el río Sinú se caracterizaron por ser de baja duración, con un promedio de 2.22 días en la duración de los pulsos de caudal alto.

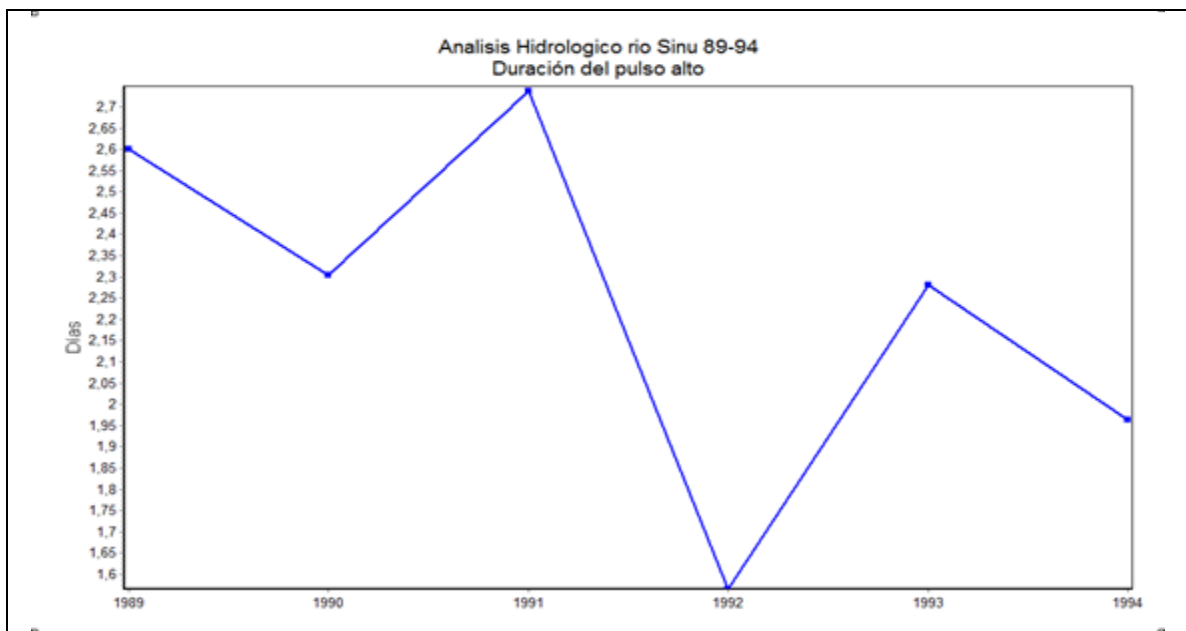


Figura 124. Duración de los pulsos altos de caudal sobre el río Sinú (1988-1994).

3.2. Tasas de variación de caudal (1988-1994).

En la Figura 14, se observa el comportamiento de las tasas de ascenso de caudales, en la cuales el promedio anual de las tasas de ascenso disminuye a $73 \text{ m}^3/\text{s}$ al día y alcanza su mínimo para el año de 1991 con valores cercanos los $62 \text{ m}^3/\text{s}$ al día.

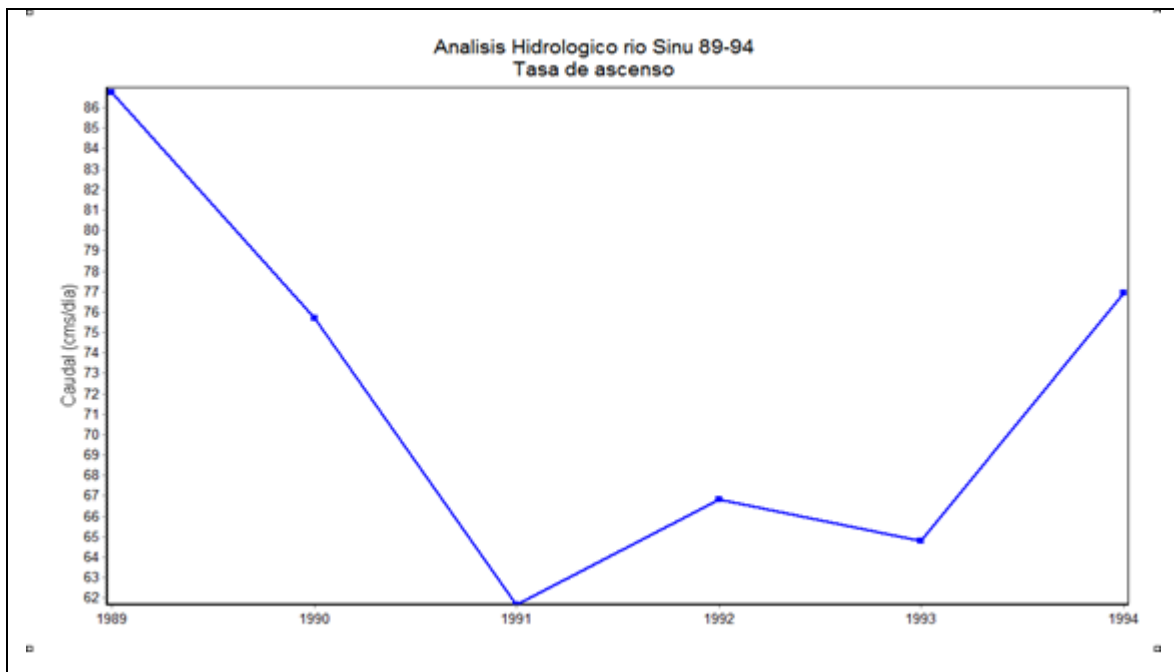


Figura 125. Tasas de ascenso de caudal río Sinú (1988-1994).

En las tasas de descenso de caudal para este periodo, el promedio anual fue de $46.33 \text{ m}^3/\text{s}$ al día, registrando valores mínimos cercanos a los $39 \text{ m}^3/\text{s}$ al día para los años de 1991 y 1992, tal como se observa en la Figura 15.

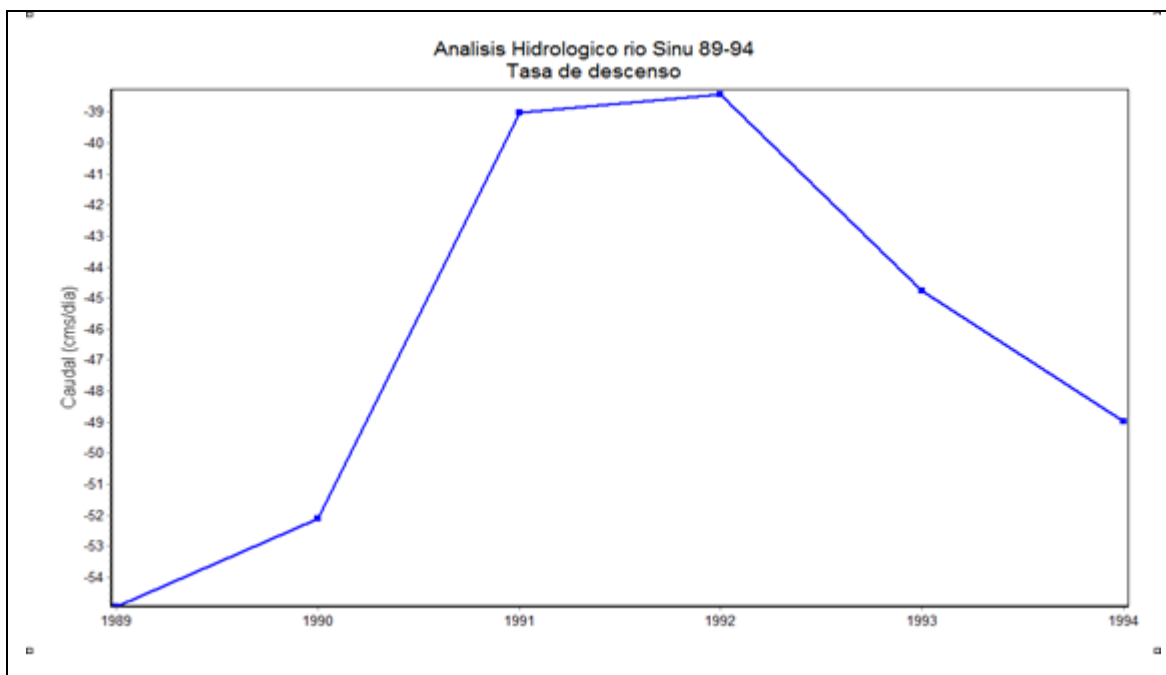


Figura 126. Tasas de descenso de caudal río Sinú (1989-1994).

4. Análisis hidrológico río Sinú (1999-2005)

4.1. Pulsos altos de caudal sobre el río Sinú (1999-2002).

En la Figura 16, se observa el régimen hidrológico del río Sinú para el periodo comprendido entre 1999 y 2002.

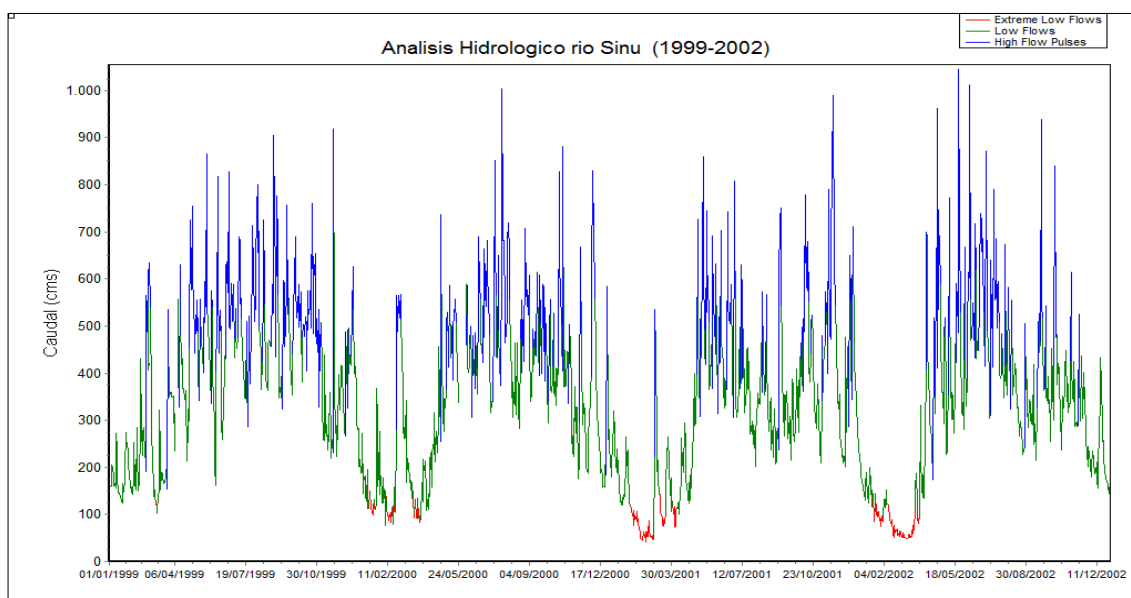


Figura 127. Análisis hidrológico río Sinú (1999-2002)

El análisis hidrológico sobre el río Sinú para el periodo (1999-2002), indica el registro de 108,5 pulsos altos de caudal, con un promedio anual de 27 pulsos de caudal alto, tal como se observa en la Figura 17.

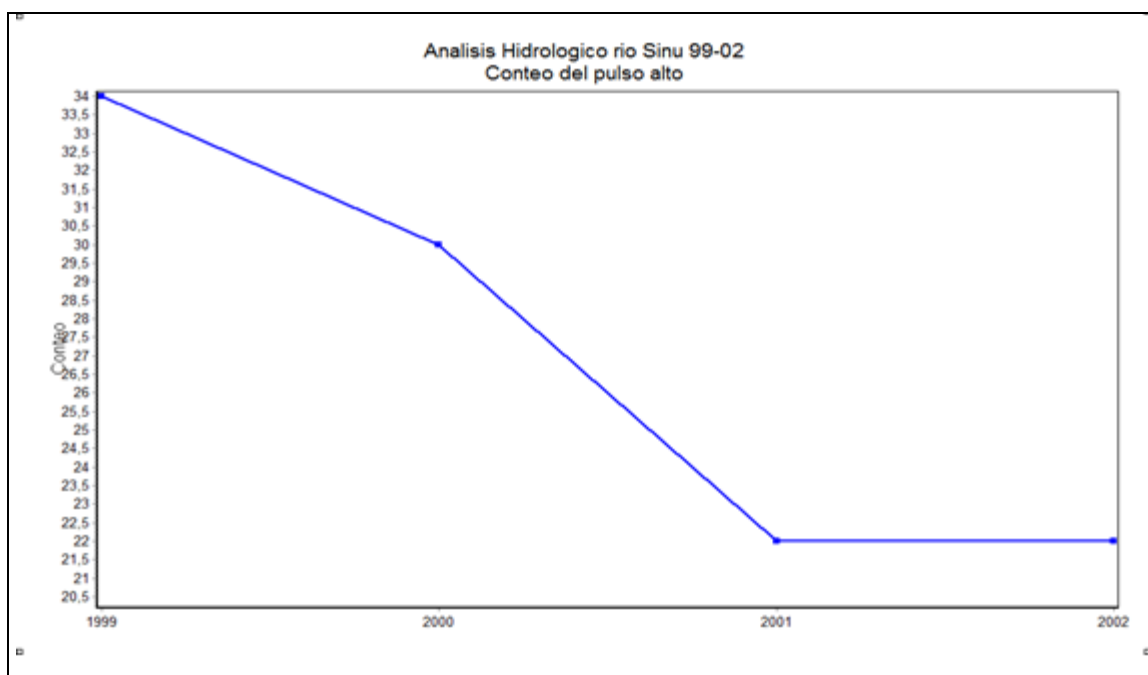


Figura 128. Análisis hidrológico pulsos altos de caudal río Sinú (1999- 2002)

En la Figura 18, se observa que para el periodo evaluado los eventos hidrológicos en el río Sinú se caracterizaron por ser de baja duración, con un promedio de 2.13 días en la duración de los pulsos de caudal alto.

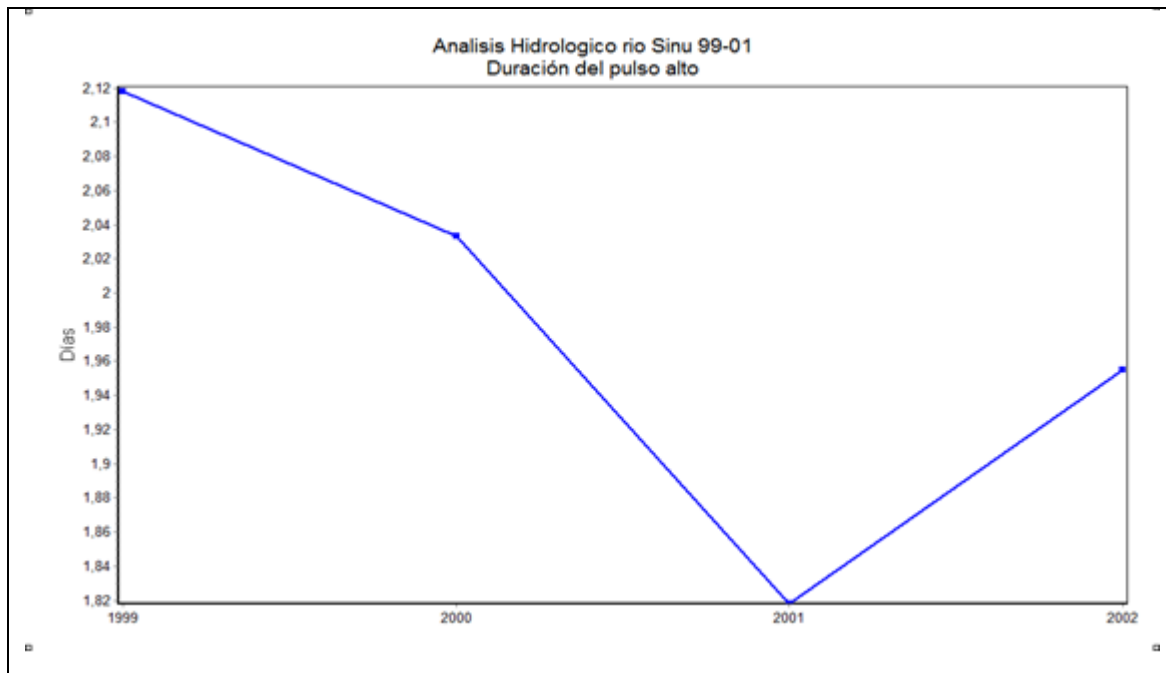


Figura 129. Análisis hidrológico pulsos altos de caudal río Sinú (1999- 2002)

4.2. Tasas de variación de caudal (1999- 2002)

La mayor tasa de ascenso se registra en el año 1999 con un valor de 97 m³/s al día y con tendencia descendente para el año 2001, que presenta registros de 80 m³/s al día. Las tasas de ascenso de caudales tienen un promedio anual de 87.75 m³/s al día. Las tasas de descenso de caudal para este periodo registran una media anual de 67.12 m³/s al día, tal como se observa en la Figura 19.

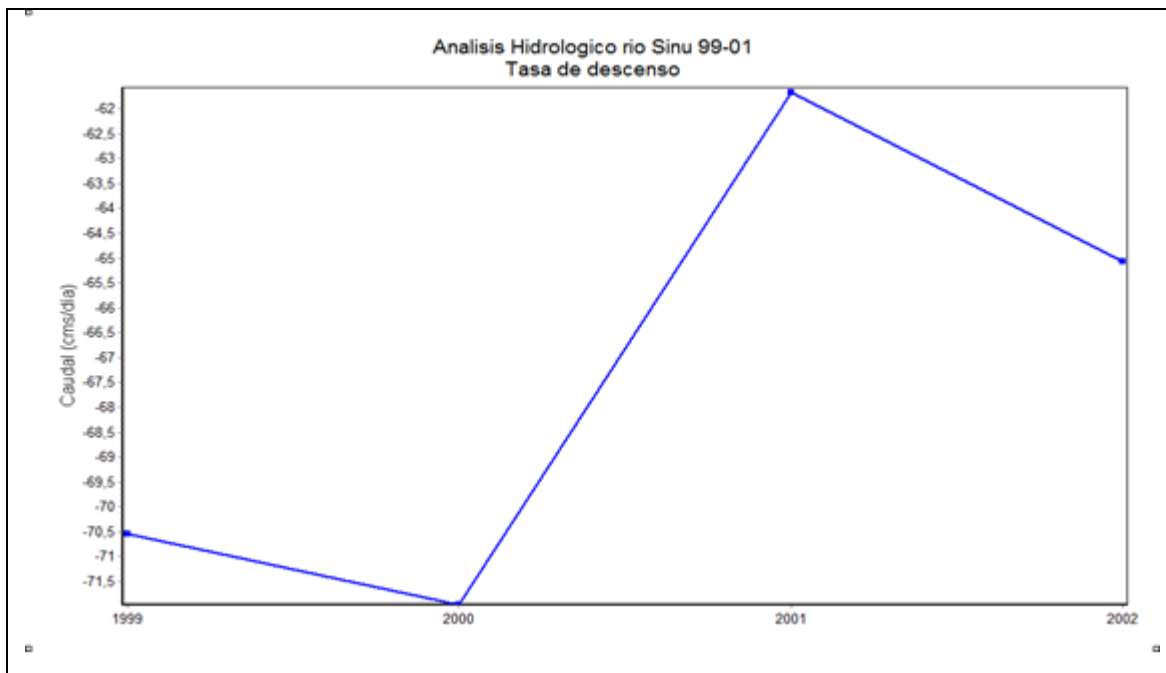


Figura 130. Tasas de descenso de caudal para el río Sinú (1999- 2002)

4.3. Pulsos altos de caudal sobre el río Sinú (2002-2004).

En la Figura 20, se observa el comportamiento hidrológico del río Sinú para el periodo comprendido entre los años 2002 y 2004.

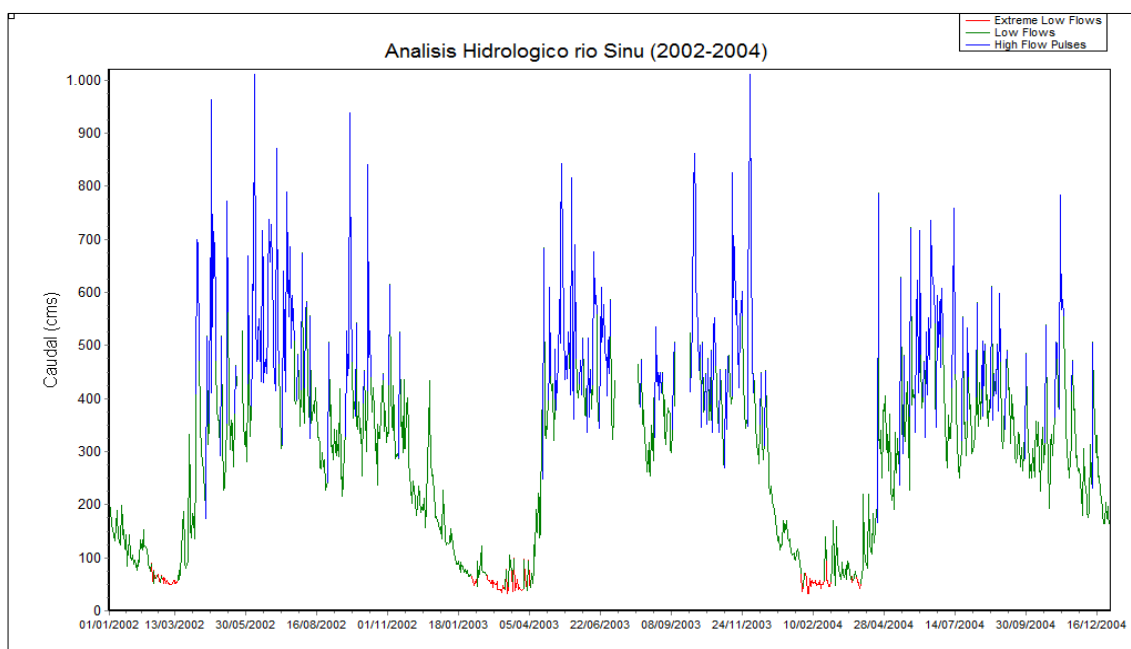


Figura 131. Análisis hidrológico del río Sinú 2002-2004.

El comportamiento hidrológico del río Sinú para el periodo 2002-2004, registran 38 pulsos altos de caudal en su promedio anual de 19 pulsos, tal como se indica en la Figura 21.

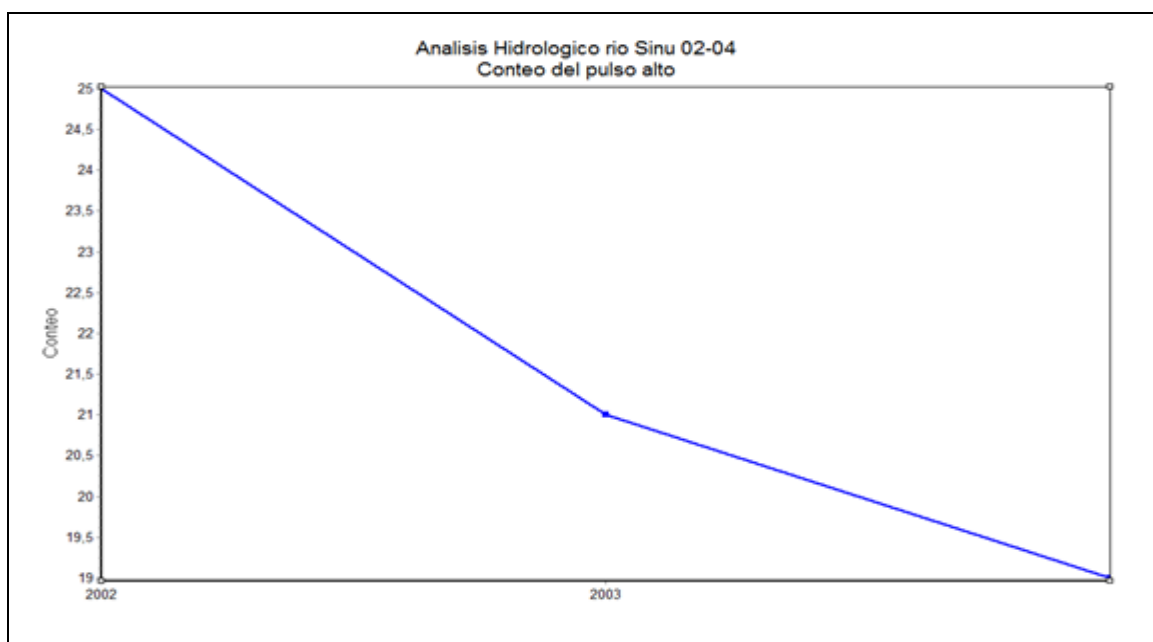


Figura 132. Pulsos altos de caudal para el río Sinú (2002- 2004)

La Figura 22, registra un leve aumento en la duración de los pulsos de caudal alto, con un promedio de 2.45 días.

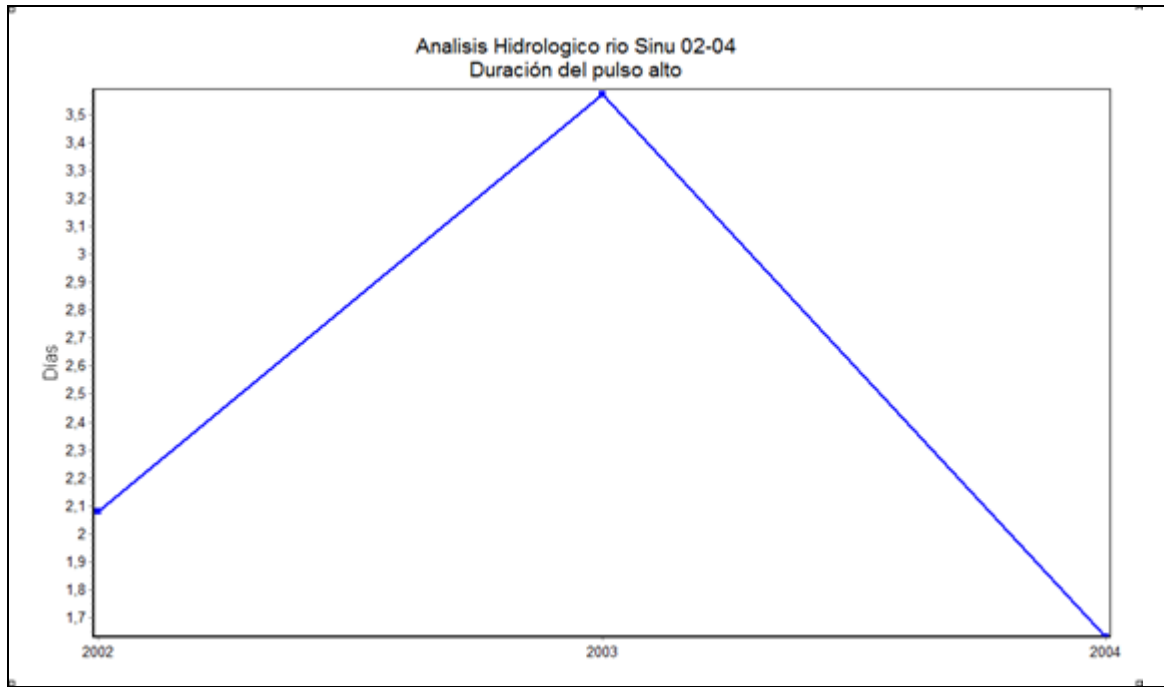


Figura 133. Duración de los pulsos altos de caudal para el río Sinú (2002- 2004)

4.4. Tasas de variación de caudal (2002- 2004)

Las tasas de ascenso de caudal para el periodo comprendido entre los años 2002 y 2004, registran un promedio anual de 77 m³/s al día, tal como se observa en la Figura 23.

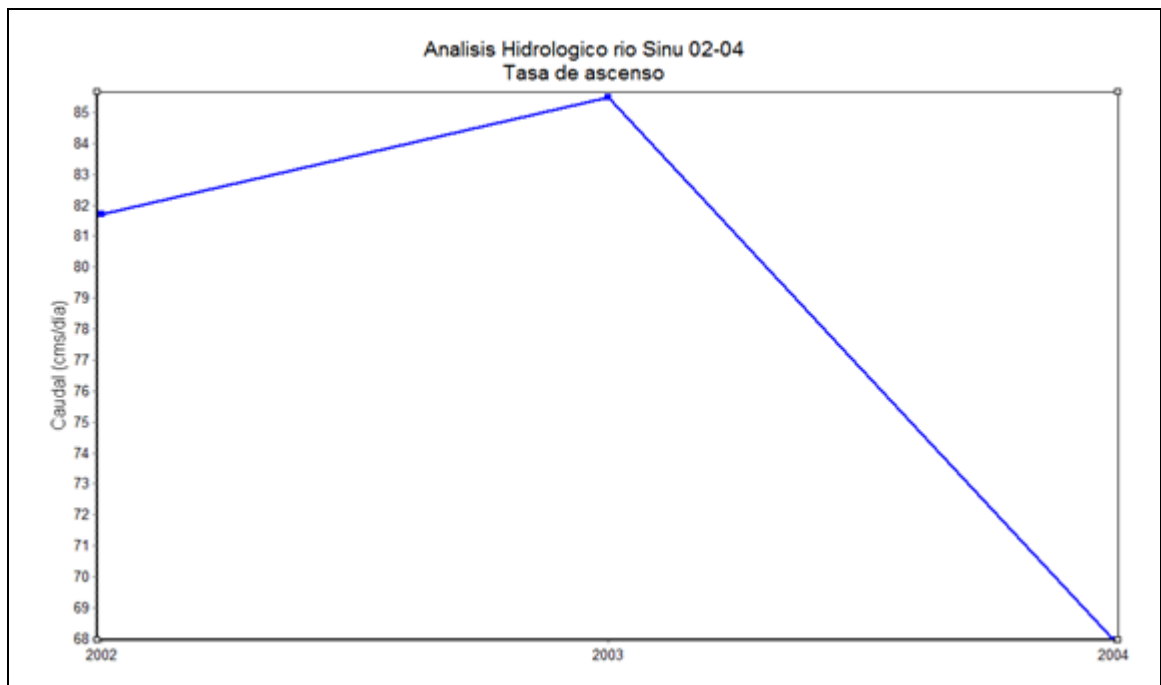


Figura 134. La tasa de ascenso para el caudal del río Sinú (2002-2004)

La Figura 24, indica que el promedio anual para las tasas de descenso de caudal registra un valor de $61 \text{ m}^3/\text{s}$ al día.

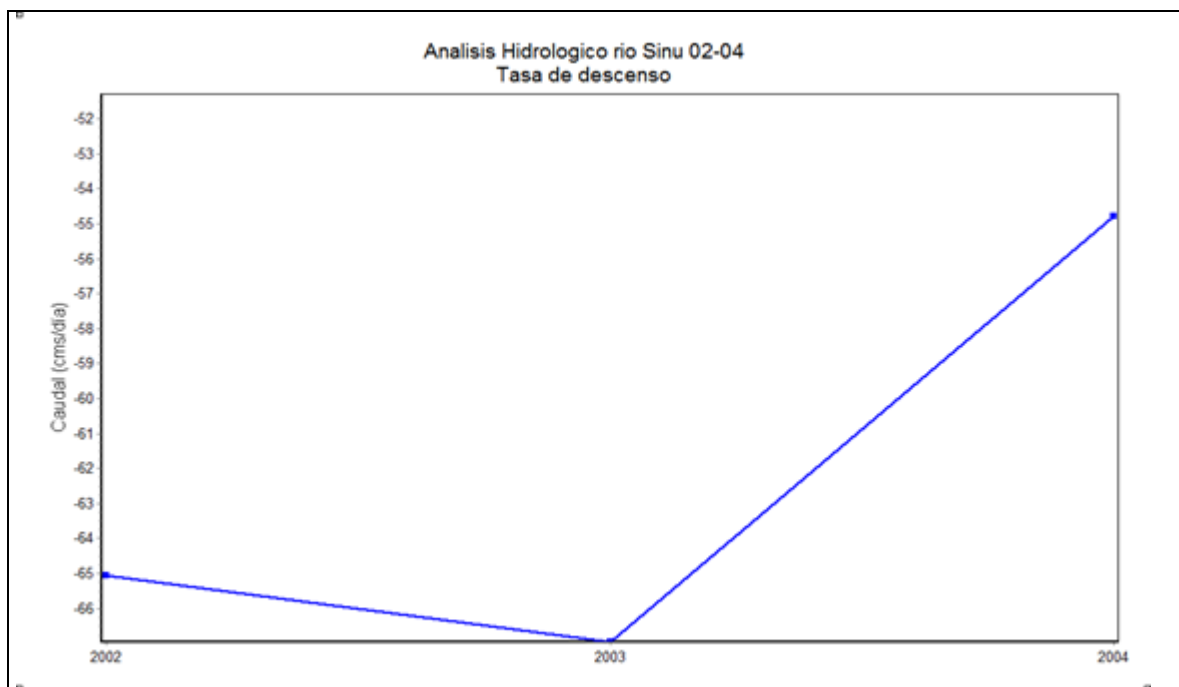


Figura 135. La tasa de descenso para el caudal del río Sinú (2002-2004)

4.5. Pulsos altos de caudal sobre el río Sinú (2004-2005).

En la Figura 25, se observa el comportamiento hidrológico del río Sinú para el periodo comprendido entre los años 2004 y 2005.

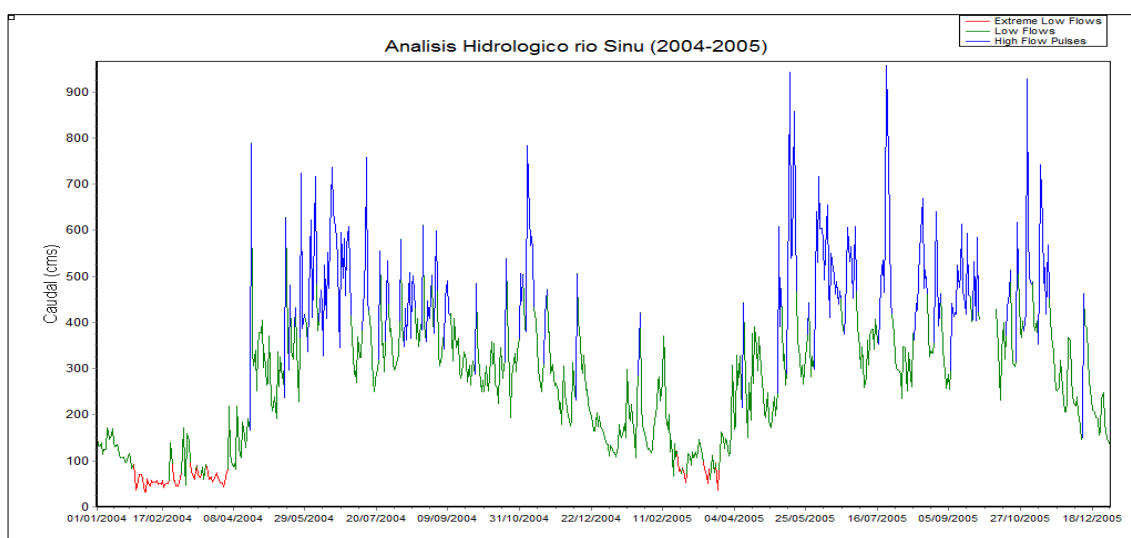


Figura 136. Análisis hidrológico río Sinú 2004-2005.

El comportamiento hidrológico entre los años 2004 y 2005, registra un promedio anual de 22 pulsos de caudal alto y la duración de los pulsos de caudal alto disminuye a 2 días.

4.6. Tasas de variación de caudal (2004- 2005)

Las tasas de ascenso de caudal para el periodo 2004-2005, registra una media anual de $86 \text{ m}^3/\text{s}$ al día y la tasa de descenso de caudal para el periodo de análisis es de $60 \text{ m}^3/\text{s}$ al día.

ANEXO 5:

CARACTERIZACION GEOMETRICA DEL RÍO SINÚ

1. Caracterización geométrica del río Sinú.

El software *MEANDER* utiliza el radio de curvatura para caracterizar geométricamente el río Sinú, ajustando matemáticamente el mejor radio de una circunferencia a la curva dentro de un meandro.

- **Ajuste de curvas del río Sinú 1961.**

Se caracterizaron 18 curvaturas para el ajuste geométrico, tal como se observa en la Figura 1, los valores mínimos en los radios de curvatura (R_c) fueron de 333 m y valores máximos de 1070 m.

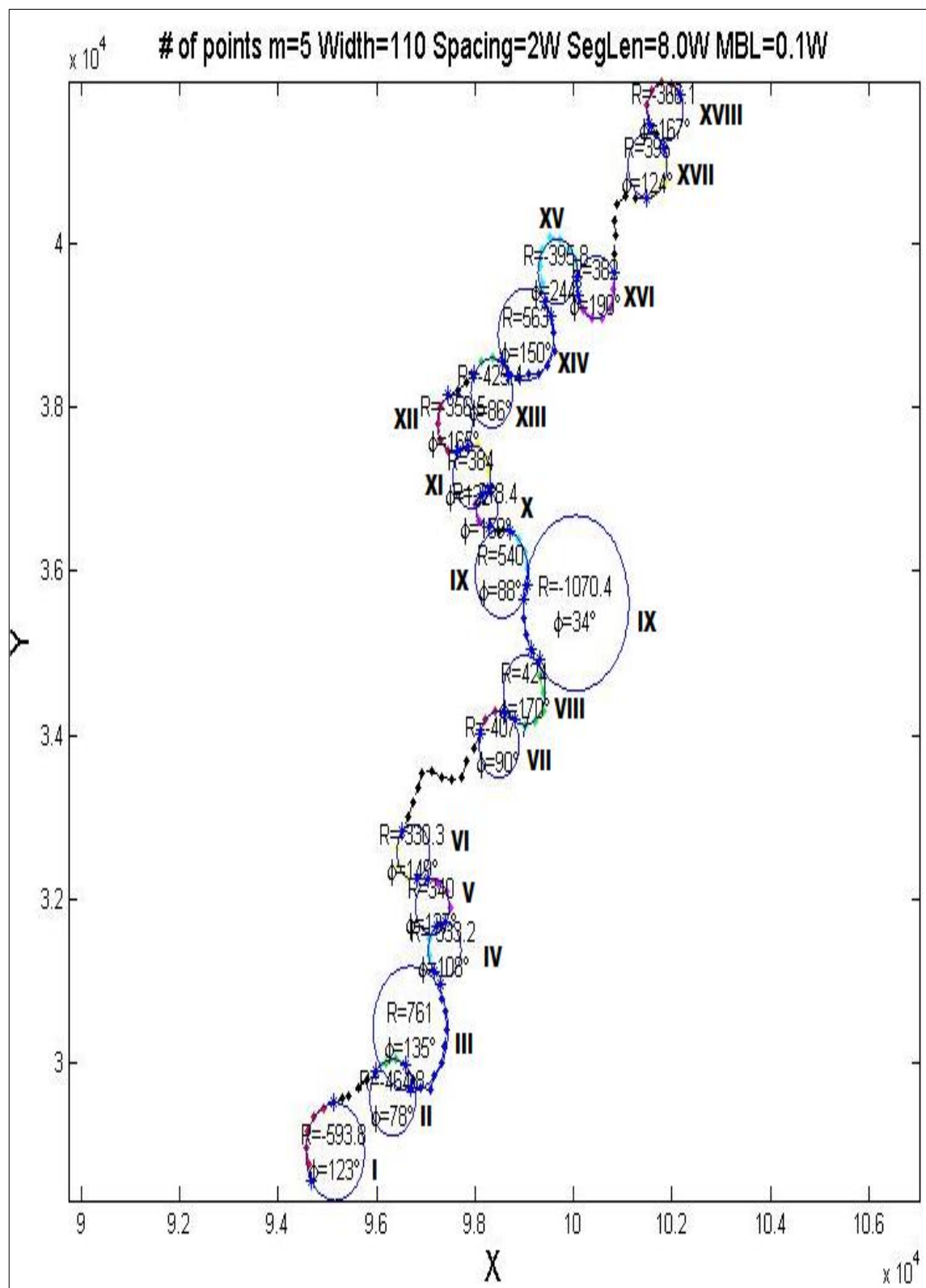


Figura 137. Caracterización geométrica mediante software Meander para el río Sinú (1961).

- **Relación radio de curvatura y ancho de canal para el río Sinú 1961.**

La Figura 2, indica el comportamiento del radio de curvatura en relación con el ancho del meandro, este indicador es relevante para determinar la tasa de erosión en las márgenes y la tasa de erosión en el fondo, debido a las particulares características del flujo en curva.

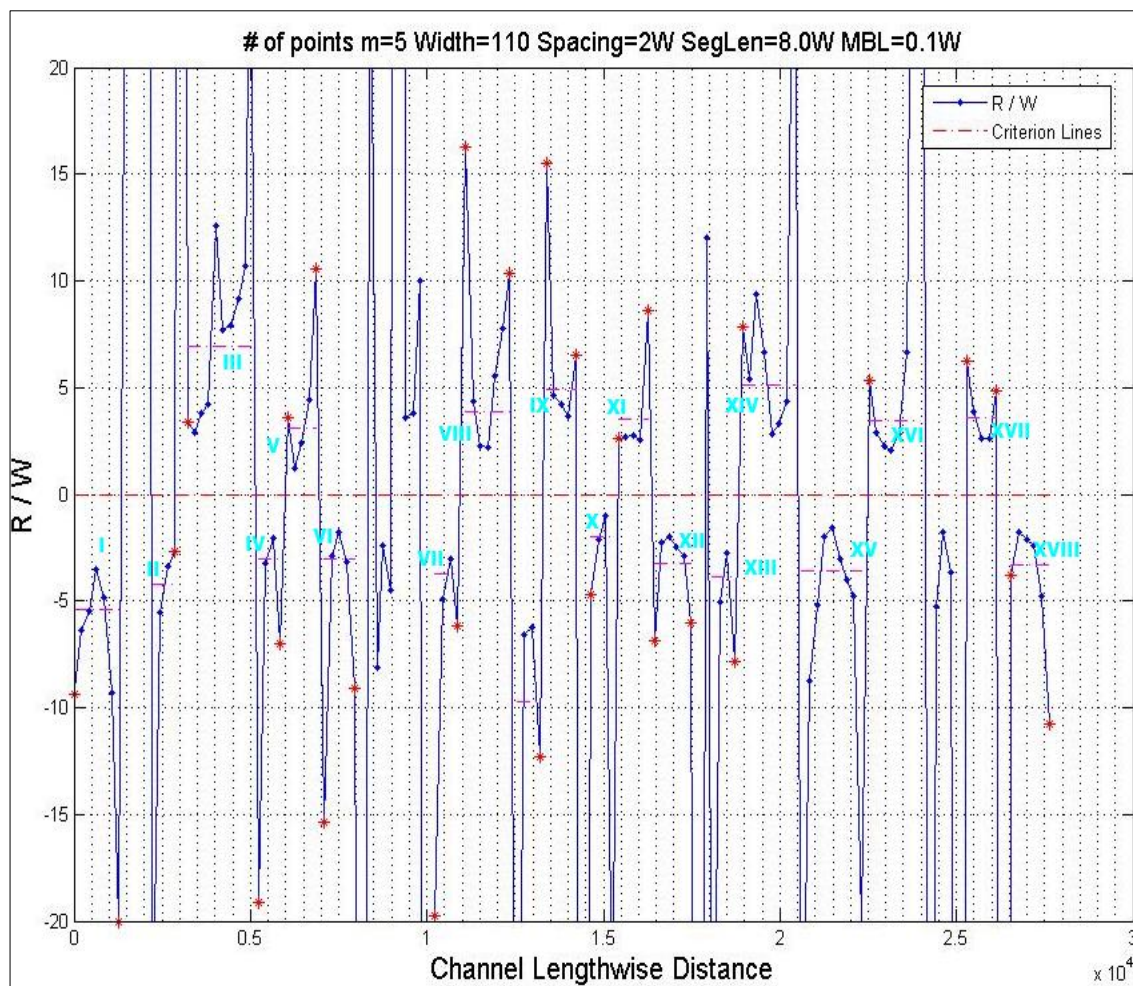


Figura 138. Relación radio de curvatura y ancho del canal para el río Sinú en el año 1961.

El promedio en la relación geométrica (R) con el ancho promedio del meandro (W) es de 4.89, tal como se indica en la Tabla 1.

Tabla 35. Valores de Rc/W para cada curvatura del río Sinú 1961.

curva	Rc/W
I	5,4
II	4,6
III	8,7
IV	4,3
V	4,6
VI	4,3
VII	4,6
VIII	4,8
IX	5
X	3,6
XI	4,8
XII	4,6
XIII	4,8
XIV	5
XV	4,8
XVI	4,8
XVII	4,8
XVIII	4,6

- **Ajuste de curvas del río Sinú 1981.**

En la Figura 3, se identifican 18 curvaturas para el ajuste geométrico del río Sinú en 1981, los valores mínimos obtenidos de radio de curvatura son para las curvas IV, IX, XII y XIII que oscilan de 425 m a 495 m y valores máximos de las curvas I, X, XI y XVII entre 998 m y 1220 m.

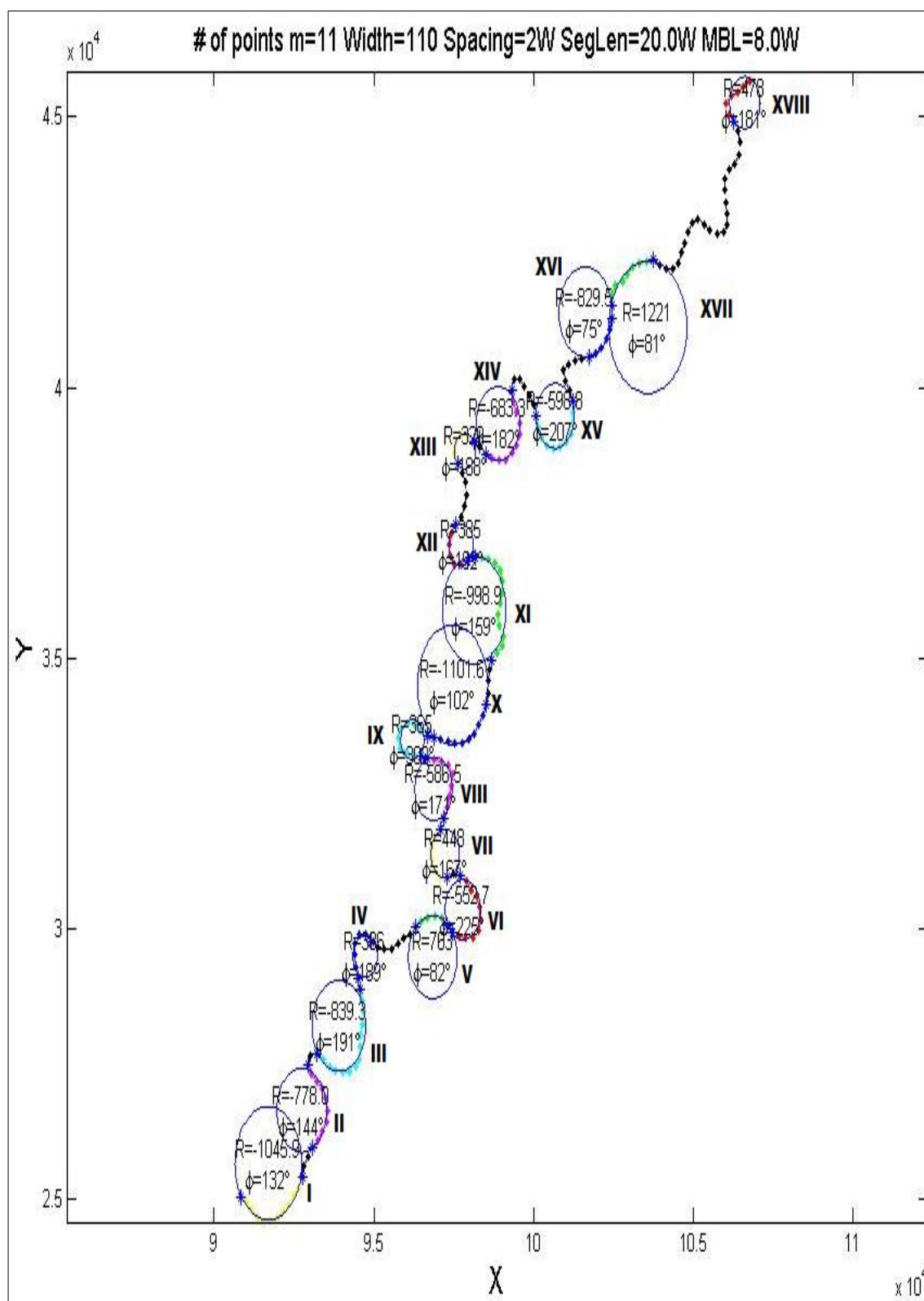


Figura 139. Caracterización geométrica mediante software Meander para el río Sinú (1981).

- Relación radio de curvatura y ancho de canal para el río Sinú 1981.

Las curvas que presentan mayor relación geométrica (R) con el ancho promedio del meandro (W) son las curvas II, VIII, IX y XVIII con un R/W cercano a 10, las curvas I, VI y X presentan valores mínimos cercanos a 3, tal como se indica en la Figura 4.

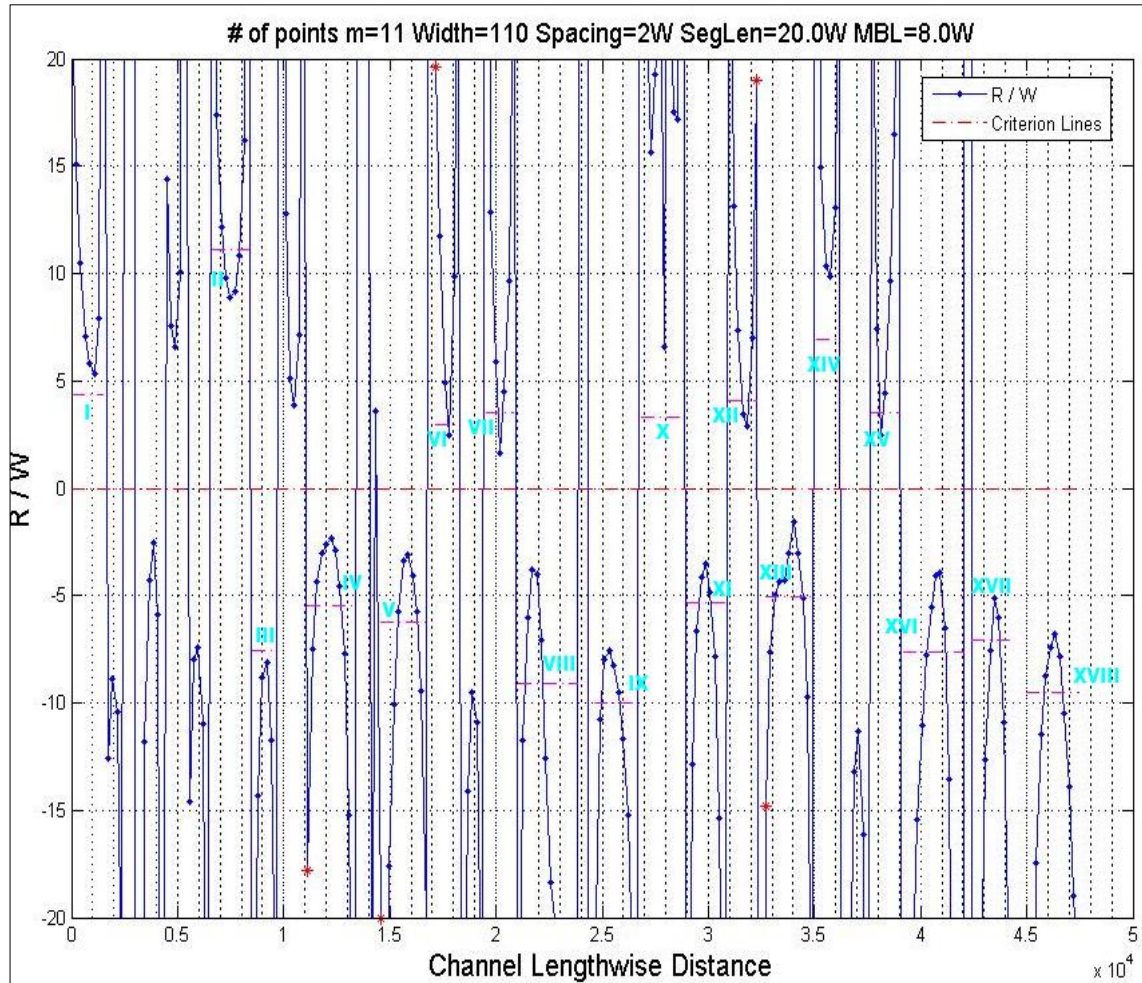


Figura 140. Relación radio de curvatura y ancho de canal para el río Sinú en el año 1981

Los valores para los radios de curvatura en relación con el ancho del meandro, se especifican en la Tabla 2. Para el año 1981 el promedio en el indicador R_c/W es 5.98.

Tabla 36. Valores de Rc/W para cada curvatura del río Sinú 1981

curva	Rc/W
I	4,3
II	11
III	7,6
IV	5,3
V	6
VI	3
VII	3,6
VIII	4
IX	5
X	3,6
XI	5,3
XII	4
XIII	5
XIV	6,6
XV	3,6
XVI	7,6
XVII	7
XVIII	9,6

- **Ajuste de Curvas del río Sinú 1988.**

La Figura 5, indica que el ajuste geométrico del río Sinú para 1988 se realiza con 12 curvaturas, los valores mínimos de radio de curvatura son para las curvas IV, VII y IX oscilan de 459 m a 540 m y valores máximos de las curvas I, VI y X entre 1570 m y 1708 m.

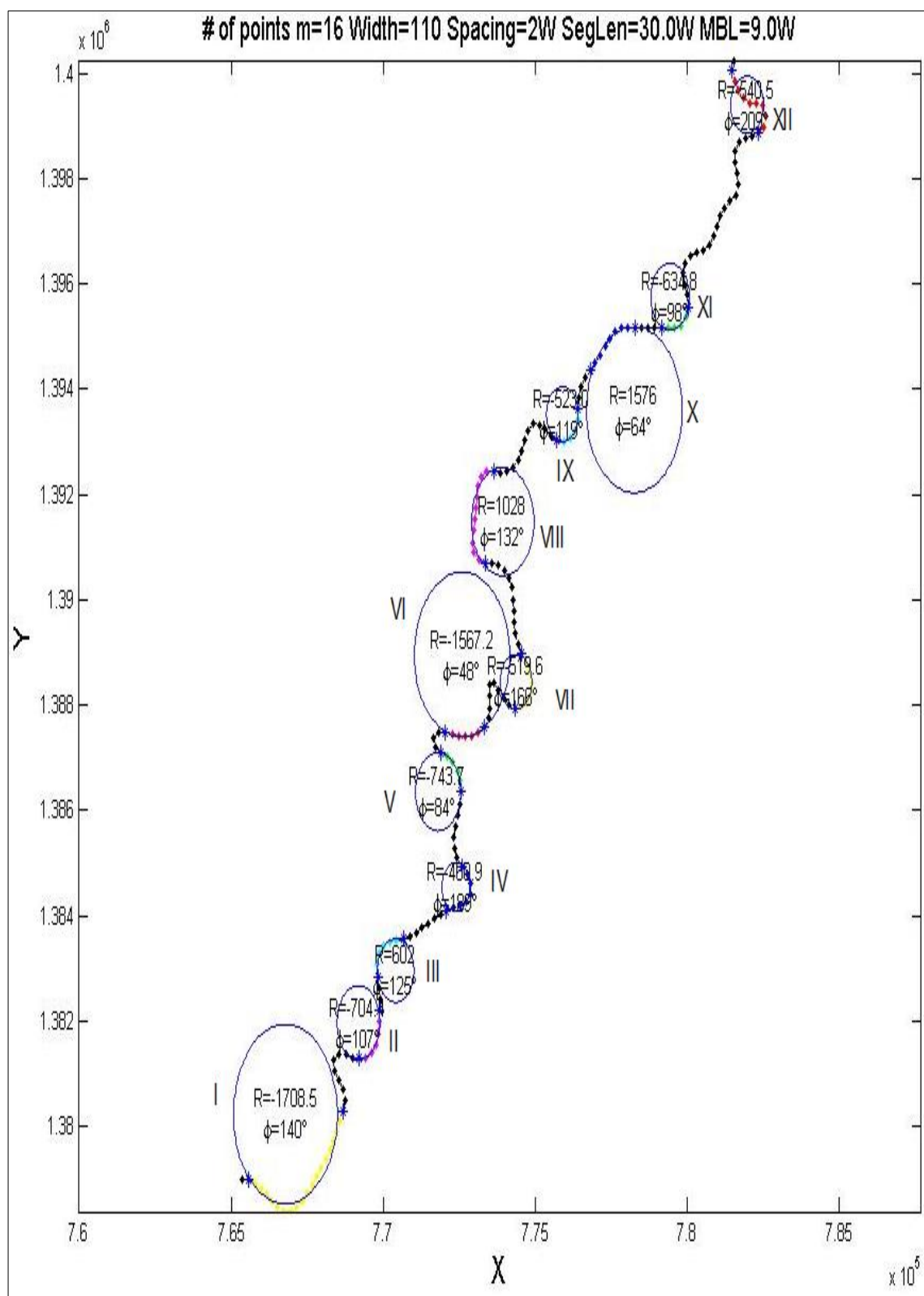


Figura 141. Caracterización geométrica mediante software Meander para el río Sinú (1988).

- **Relación radio de curvatura y ancho de canal para el del río Sinú 1988.**

La relación radio de curvatura y ancho se acentúa con curvas limitadas, tal como se indica en la Figura 6. Los valores máximos para este indicador se observan en las curvas III, VII y XII, mientras que los valores mínimos se presentan en las curvaturas VI y IX.

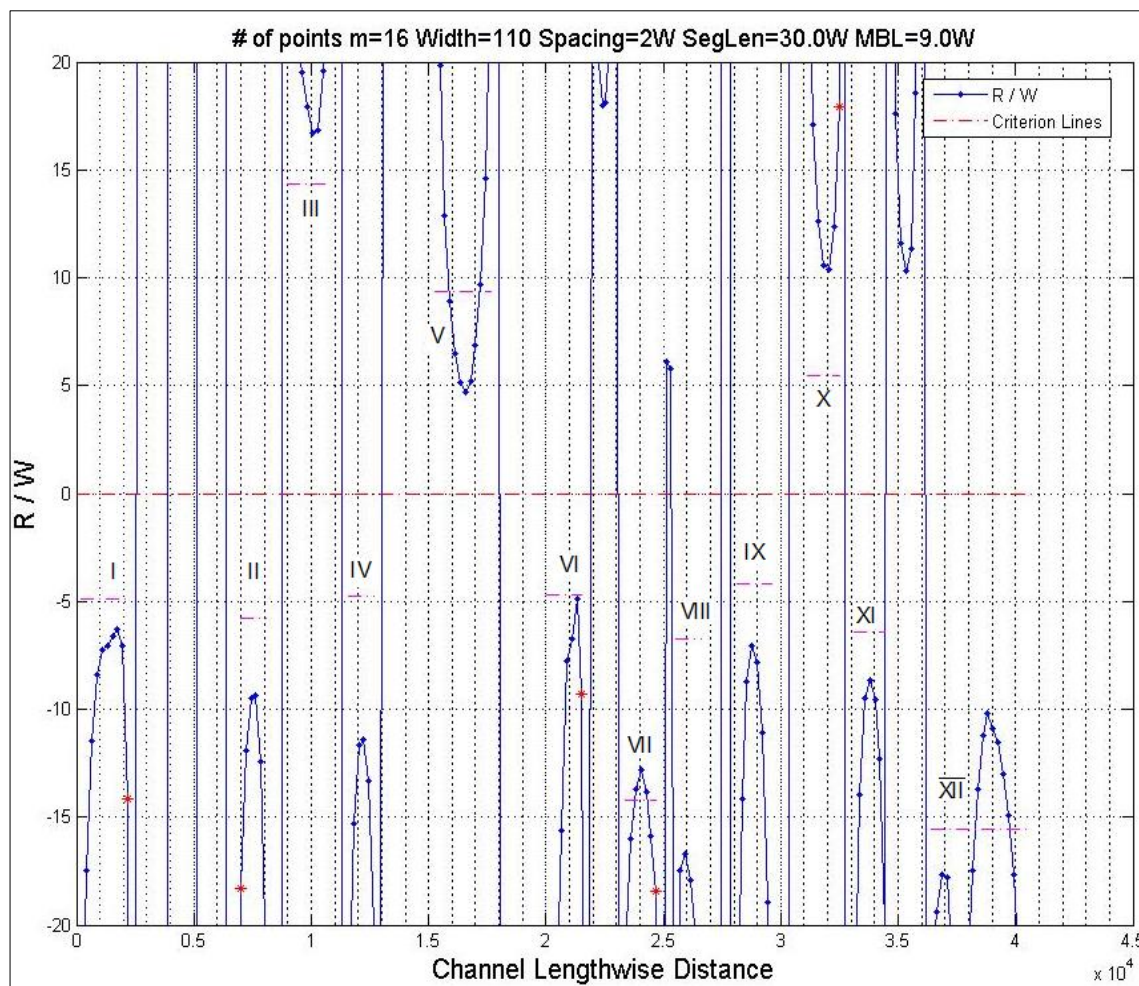


Figura 142. Relación radio de curvatura y ancho de canal para el río Sinú en el año 1988.

En la Tabla 3, los radios de curvatura en relación con el ancho del meandro para el año 1988, incrementaron su valor promedio en 7.90.

Tabla 37. Valores de Rc/W para cada curvatura del río Sinú 1988.

curva	Rc/W
I	5
II	6
III	14
IV	5
V	9
VI	4
VII	14
VIII	7
IX	4
X	5,3
XI	6,3
XII	15,3

- **Ajuste de curvas del río Sinú 1994.**

El ajuste geométrico para la forma en planta del río Sinú en 1994, se identificaron 15 curvaturas, tal como se observa en la Figura 7. Los valores mínimos en los radios de curvatura (Rc), se identificaron en las curvas II, III, V, VII, VIII, IX, X, XI, XII y XIII y oscilaron entre 403 m y 536 m, los valores máximos entre 970 m y 1112 m para las curvas I, VI y XIV.

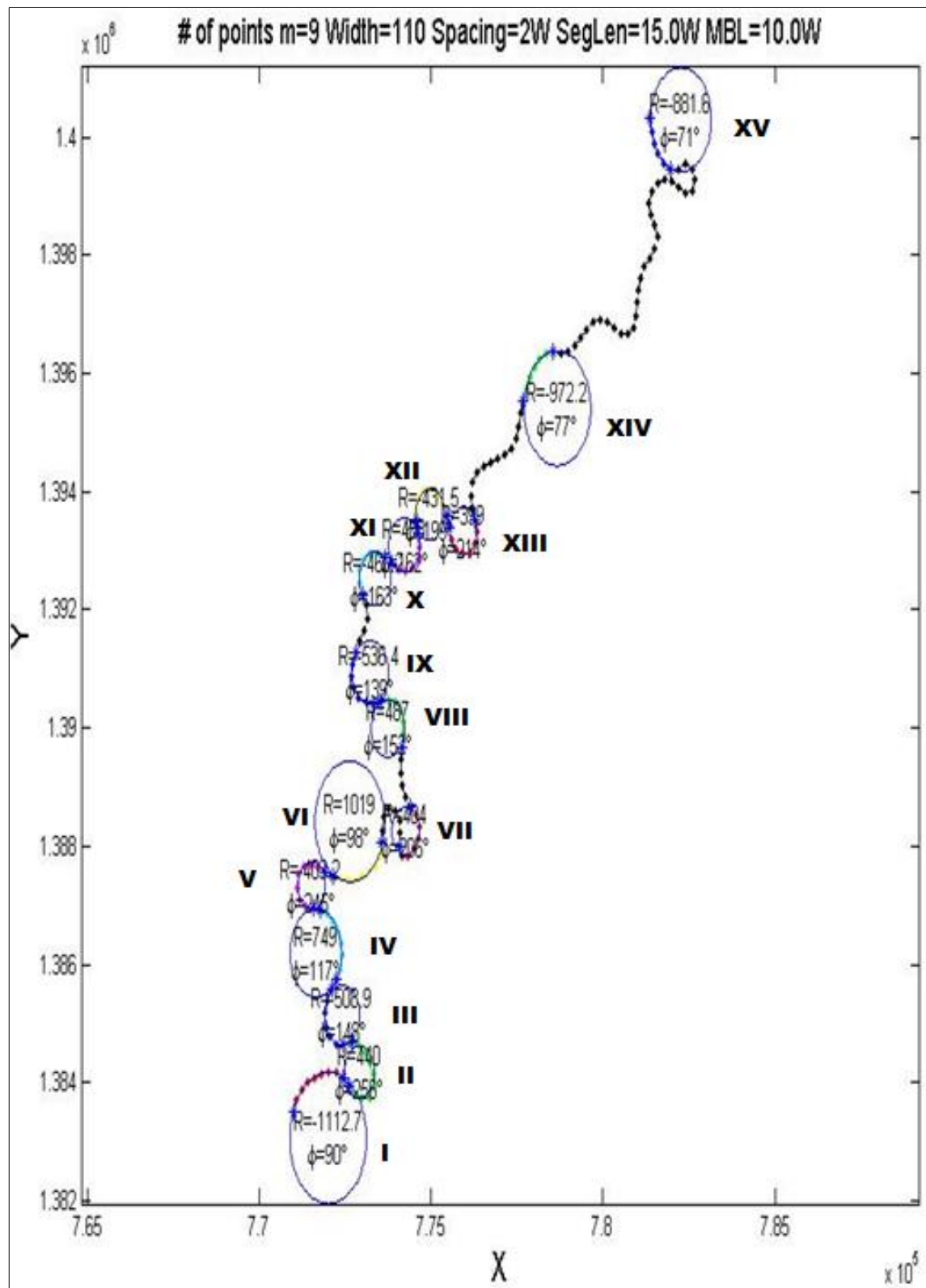


Figura 143. Caracterización geométrica mediante software Meander para el río Sinú (1994).

- **Relación radio de curvatura y ancho de canal para el río Sinú 1994.**

La Figura 8, indica el comportamiento del radio de curvatura en relación con el ancho del meandro, las curvas que presentan mayor relación geométrica (R) con el ancho promedio del meandro (W) son las curvas I, VI y XIV con un R/W cercano a 10.

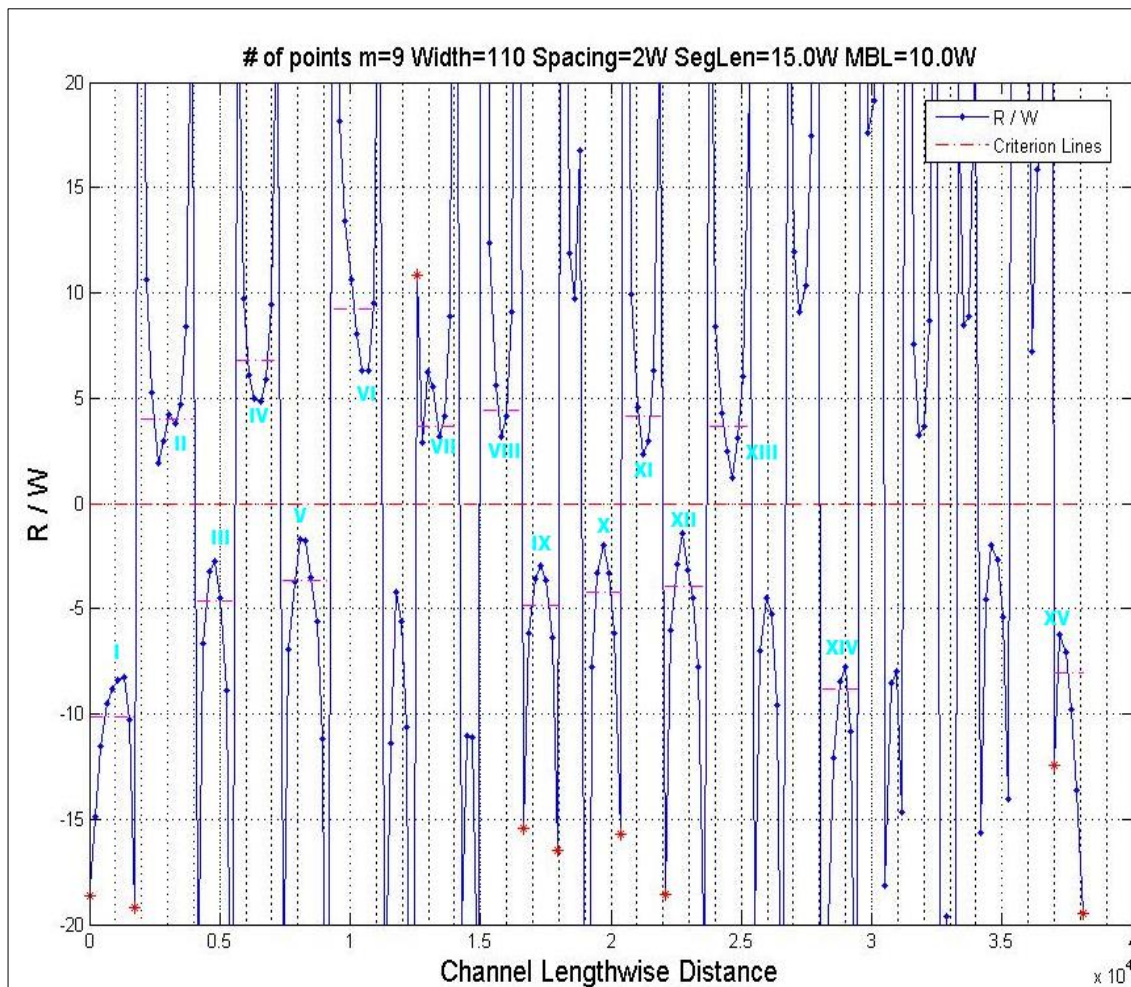


Figura 144. Relación radio de curvatura y ancho del canal para el río Sinú en el año 1994.

La Tabla 4, indica los valores de R/W para las curvaturas del río Sinú en 1994, presenta un promedio 5.90 para este indicador.

Tabla 38. Valores de R_c/W para cada curvatura del río Sinú 1994.

curva	R_c/W
I	10
II	4,3
III	4,66
IV	7,3
V	4
VI	9,3
VII	4,3
VIII	4,5
IX	5
X	4,5
XI	4,5
XII	4,5
XIII	4,3
XIV	9
XV	8,3

- **Ajuste de Curvas del río Sinú 1999.**

La Figura 9, se observa el ajuste geométrico a 16 curvaturas sobre el río Sinú, los valores mínimos de radio de curvatura para las curvas IV, V, XI, XII y XIII, con valores que oscilan de 416 m a 450 m y valores máximos para las curvas VIII y XV entre 1055 m y 1238 m.

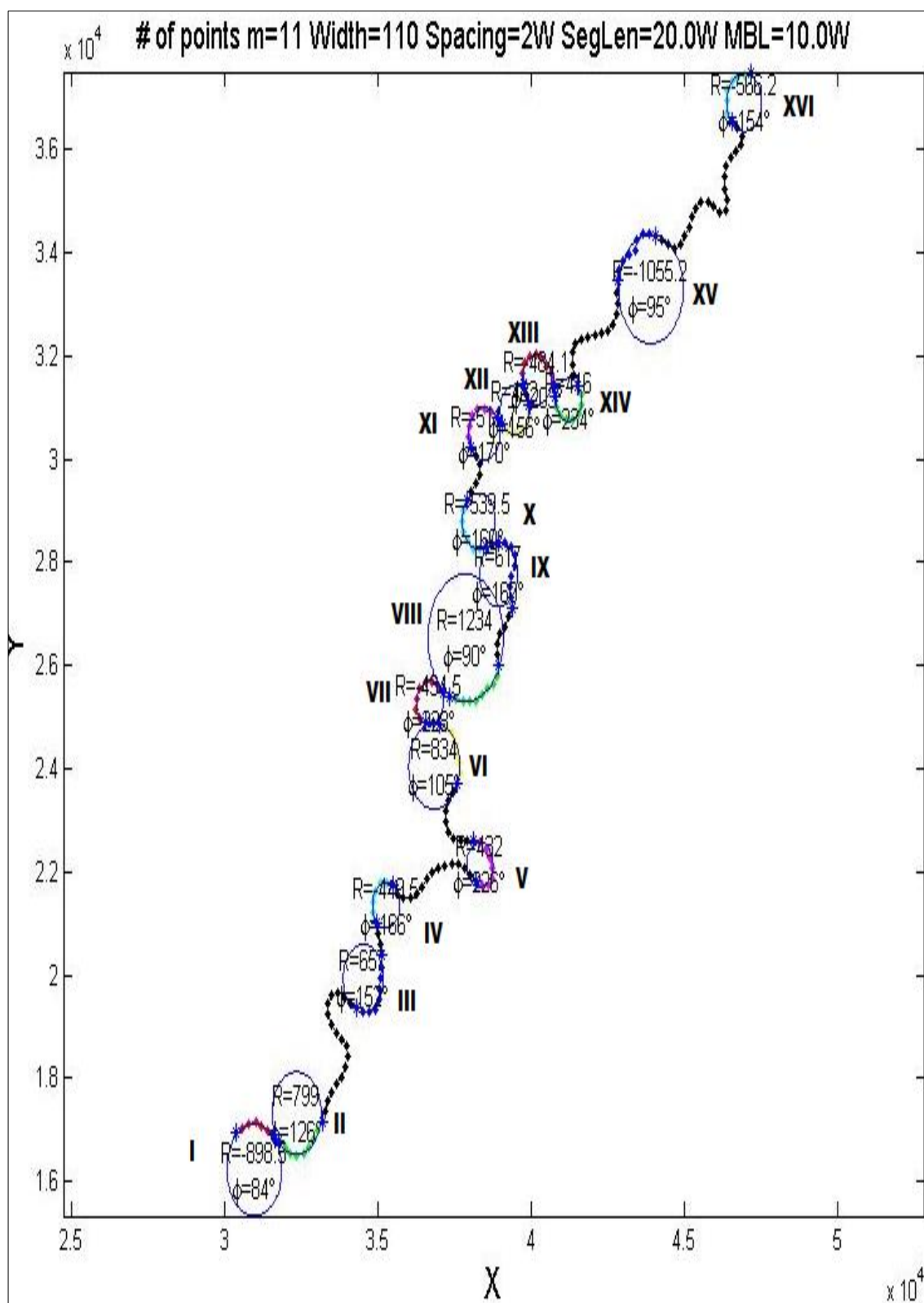


Figura 145. Caracterización geométrica mediante software Meander para el río Sinú (1999).

- **Relación radio de curvatura y ancho de canal para el río Sinú 1999.**

La relación radio de curvatura y ancho se acentúa con curvas limitadas, tal como se indica en la Figura 10. Los valores máximos para este indicador se observan en las curvas I y VIII, mientras que los valores mínimos se presentan en las curvaturas V y VII.

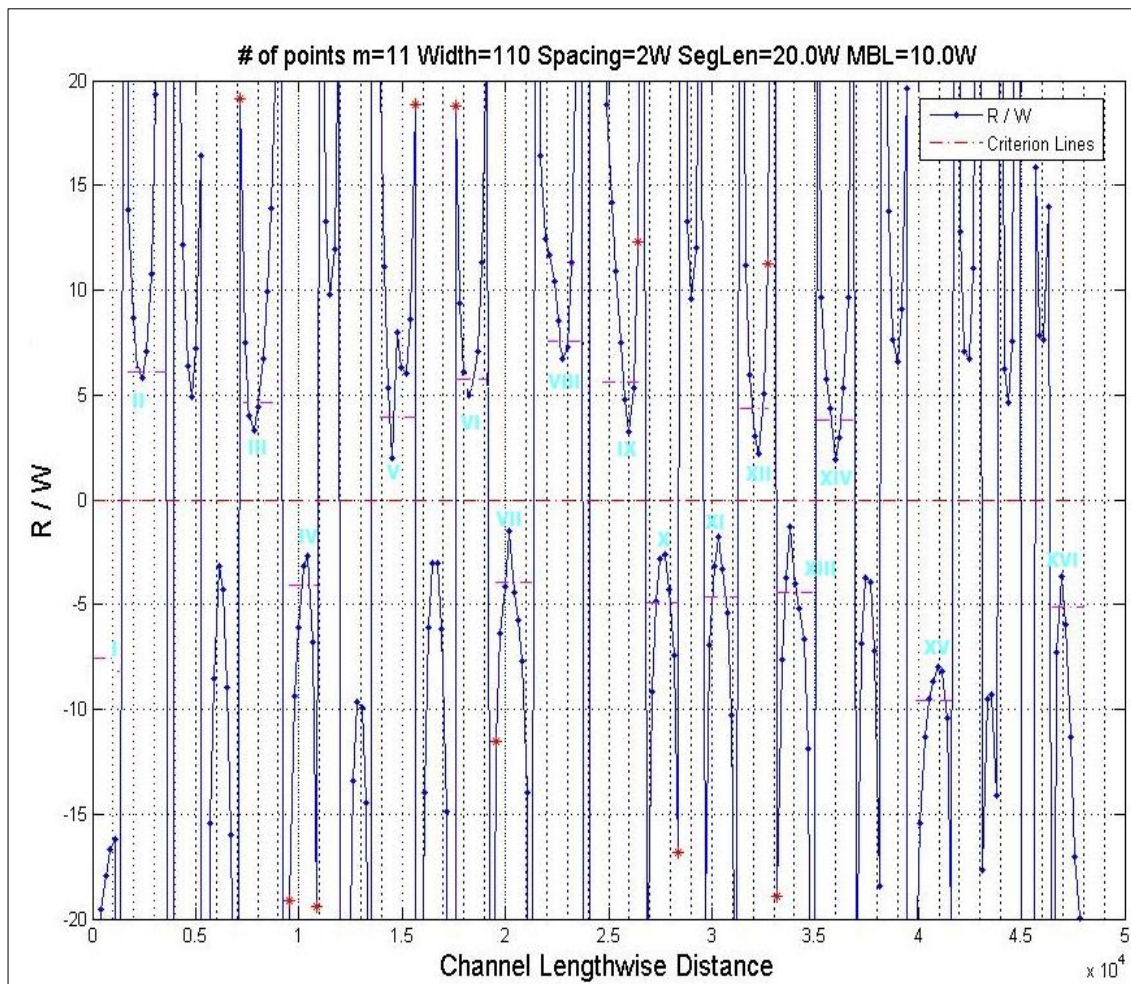


Figura 146. Relación radio de curvatura y ancho de canal para el río Sinú en el año 1999.

En la Tabla 5, se observan los radios de curvatura en relación con el ancho del meandro para el año 1999, incrementaron su valor promedio en 5.21.

Tabla 39. Valores de Rc/W para cada curvatura del río Sinú 1999.

curva	Rc/W
I	7,6
II	6
III	4,6
IV	3,6
V	3,6
VI	6
VII	3,6
VIII	7,3
IX	5,3
X	5
XI	4,6
XII	4,3
XIII	4,3
XIV	3,6
XV	9
XVI	5

- **Ajuste de curvas del río Sinú 2002.**

En la Figura 11, se observa el ajuste geométrico para la forma en planta del río Sinú en 2002, se identificaron 15 curvaturas con valores mínimos en los radios de curvatura (Rc) de 416 m y valores máximos de 1234 m.

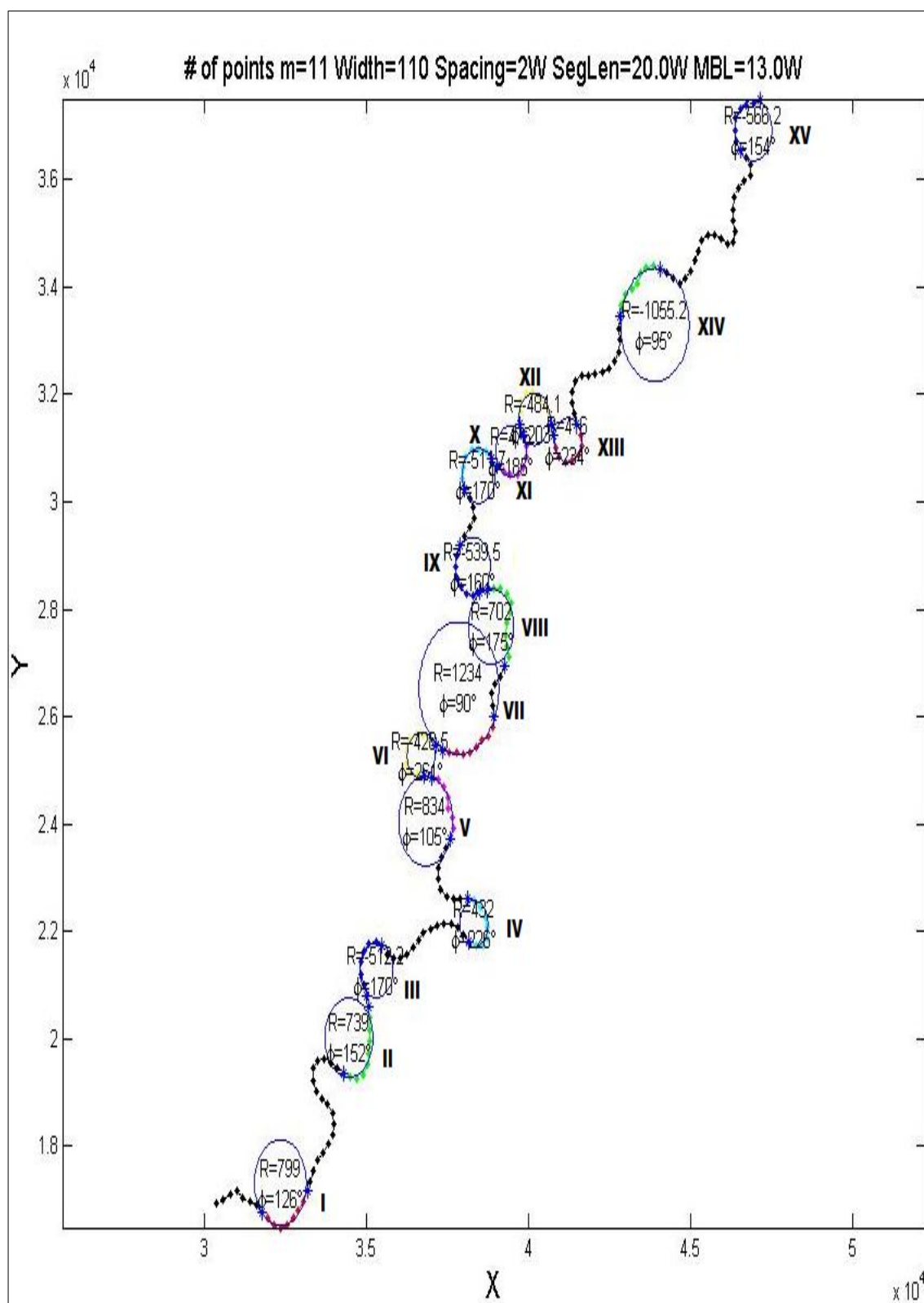


Figura 147. Caracterización geométrica mediante software Meander para el río Sinú (2002).

- **Relación radio de curvatura y ancho de canal para el río Sinú 2002.**

La Figura 12, indica el comportamiento del radio de curvatura en relación con el ancho del meandro, las curvas con mayor valor en este indicador son las curvas VII y XIV las cuales presentan un valor cercano a 8.

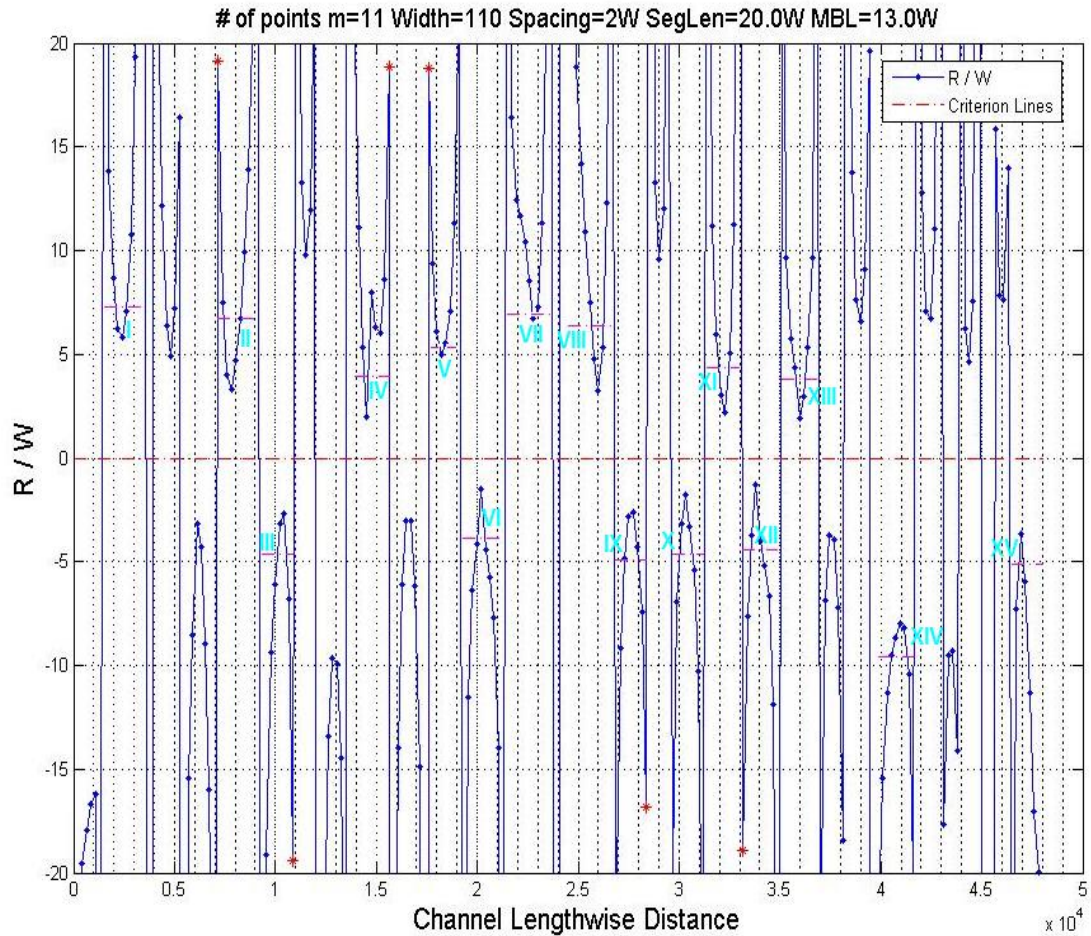


Figura 148. Relación radio de curvatura y ancho del canal para el río Sinú en el año 2002.

La Tabla 6, indica los valores del indicador R/W, para las curvaturas del río Sinú en 2002, el promedio para este indicador es de 5.3.

Tabla 40. Valores de Rc/W para cada curvatura del río Sinú 2002.

curva	Rc/W
I	7
II	6,3
III	4,6
IV	3,6
V	5,3
VI	3,6
VII	7
VIII	6,3
IX	5
X	4,6
XI	4,3
XII	4,3
XIII	3,6
XIV	9
XV	5

- **Ajuste de curvas del río Sinú 2004.**

En la Figura 13, se observa el ajuste geométrico para la forma en planta del río Sinú en 2004, en la cual se identificaron 17 curvaturas. Los valores mínimos obtenidos de radio de curvatura para las curvas III, V, XIII y XV oscilan de 205 m a 420 m y valores máximos de las curvas IX y XVI entre 1100 m y 1165 m.

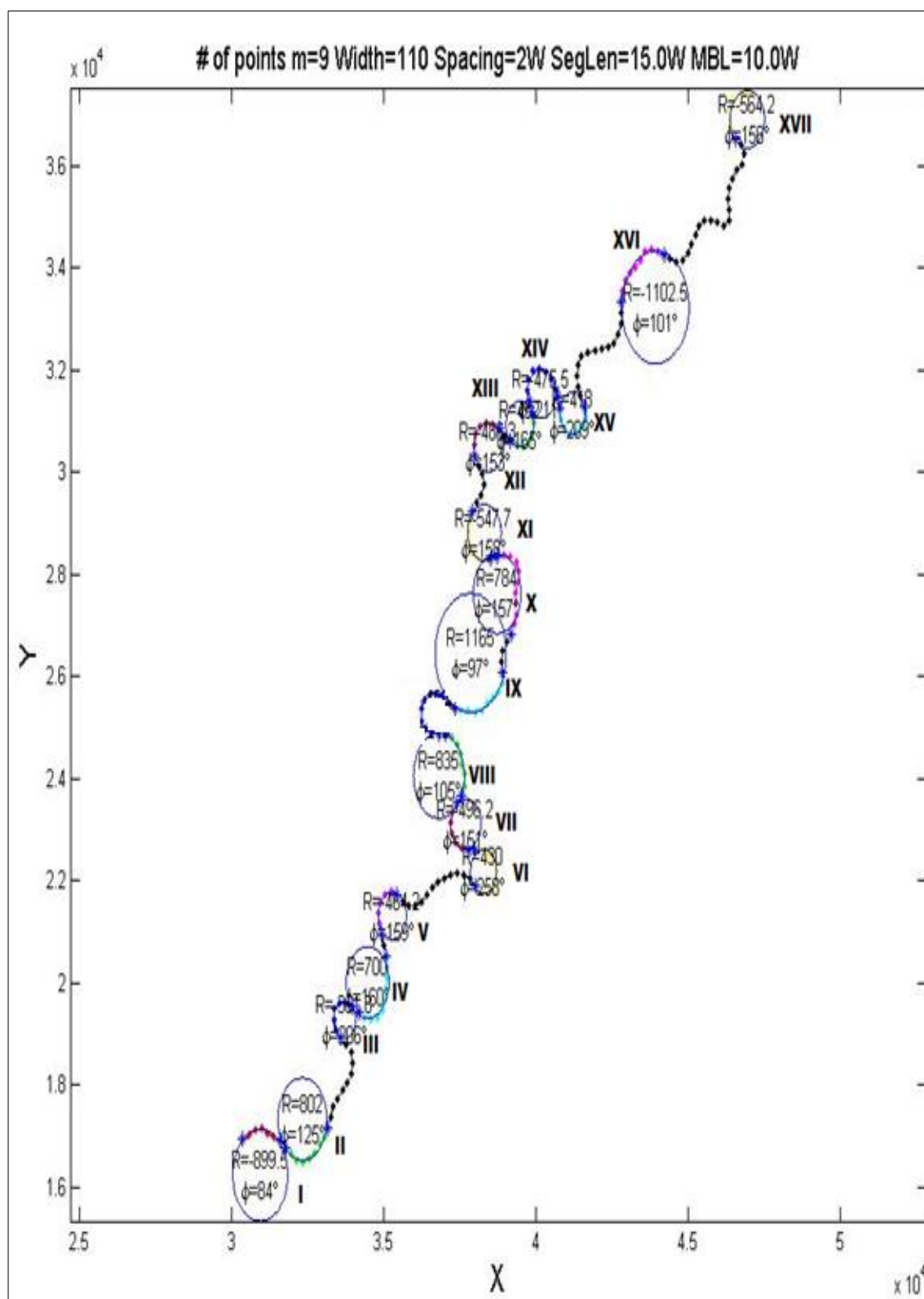


Figura 149. Caracterización geométrica mediante software Meander para el río Sinú (2004).

- **Relación radio de curvatura y ancho de canal para el río Sinú 2004.**

Las curvaturas IX y XVI presentan una mayor relación entre el radio de curvatura y el ancho de canal. Sin embargo, las curvaturas restantes presentan un comportamiento similar en este indicador con valores cercanos a 5, tal como se observa en la Figura 14.

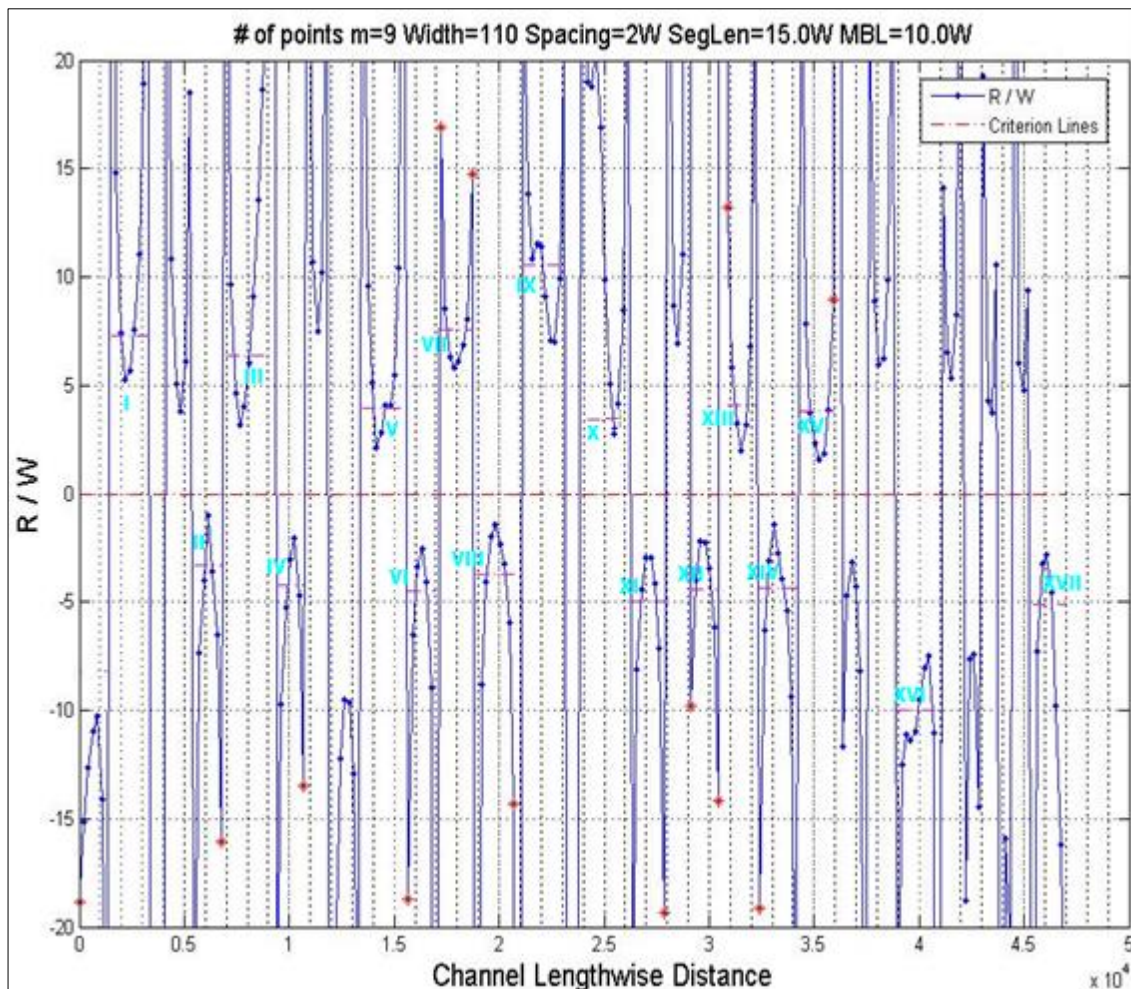


Figura 150. Relación radio de curvatura y ancho de canal para el río Sinú 2004.

En la Tabla 7, se observan los radios de curvatura en relación con el ancho del meandro, valor promedio de 5.39 de este indicador para el río Sinú en 2004.

Tabla 41. Valores de Rc/W para cada curvatura del río Sinú 2004.

curva	Rc/W
I	7
II	4
III	6
IV	4,3
V	4,3
VI	4,3
VII	7
VIII	4
IX	10,3
X	3,6
XI	5
XII	4,3
XIII	4,3
XIV	4,3
XV	4
XVI	10
XVII	5

- **Ajuste de Curvas del río Sinú 2005.**

La Figura 15, se observa el ajuste geométrico a 15 curvaturas sobre el río Sinú en 2005, los valores mínimos de radio de curvatura son para las curvas IV, VI y XIII que oscilan de 416 m a 450 m, los valores máximos son para las curvas XII y XIV entre 1055 m y 1238 m.

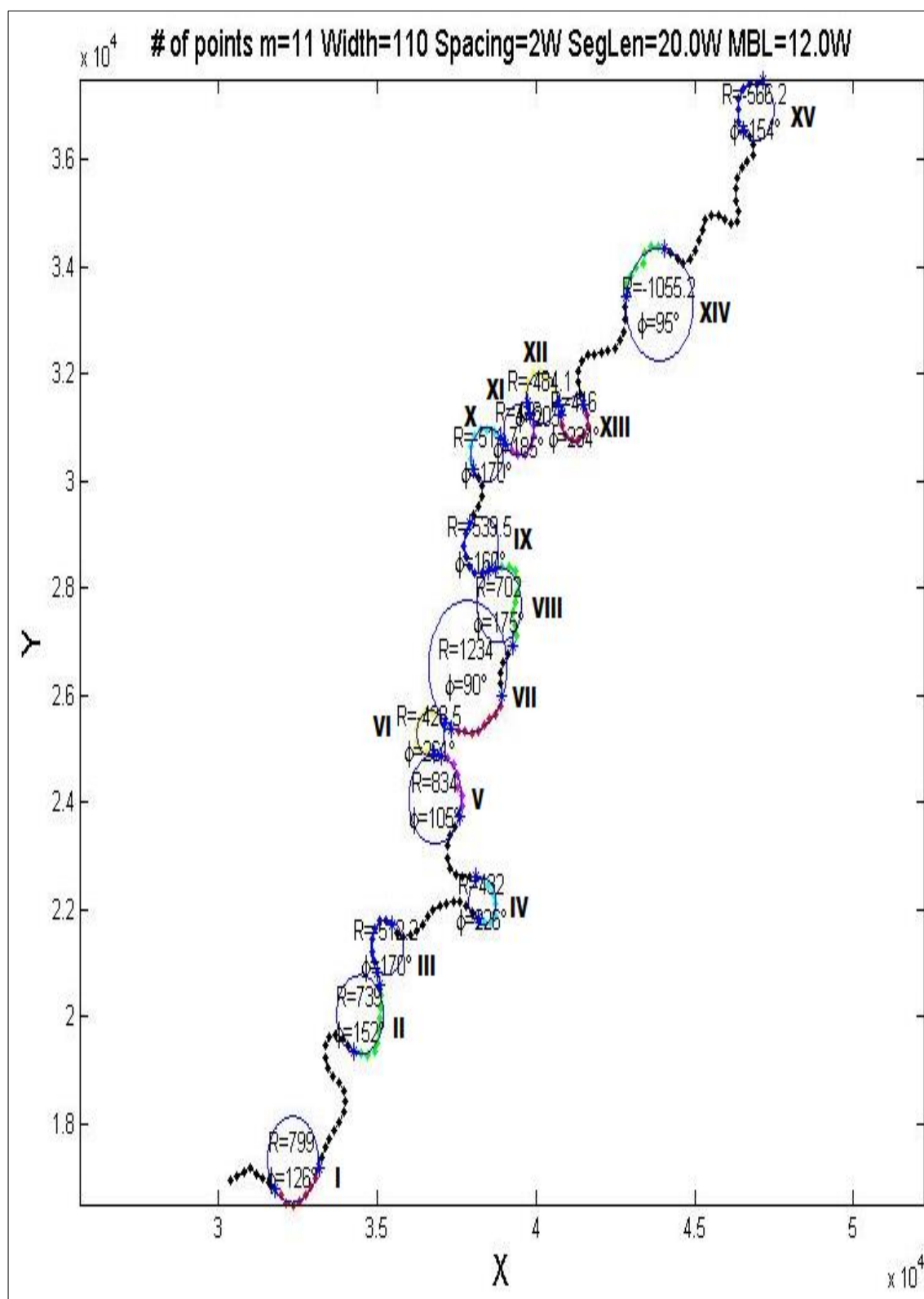


Figura 151. Caracterización geométrica mediante software Meander para el río Sinú (2005).

- **Relación radio de curvatura y ancho de canal para el río Sinú 2005.**

El comportamiento entre el radio de curvatura y el ancho del río Sinú en 2005, indican que los valores mínimos de 2 presentes en la curvas II y XII, las curvaturas restantes presentan un valor cercano a 5, tal como se observa en la Figura 16.

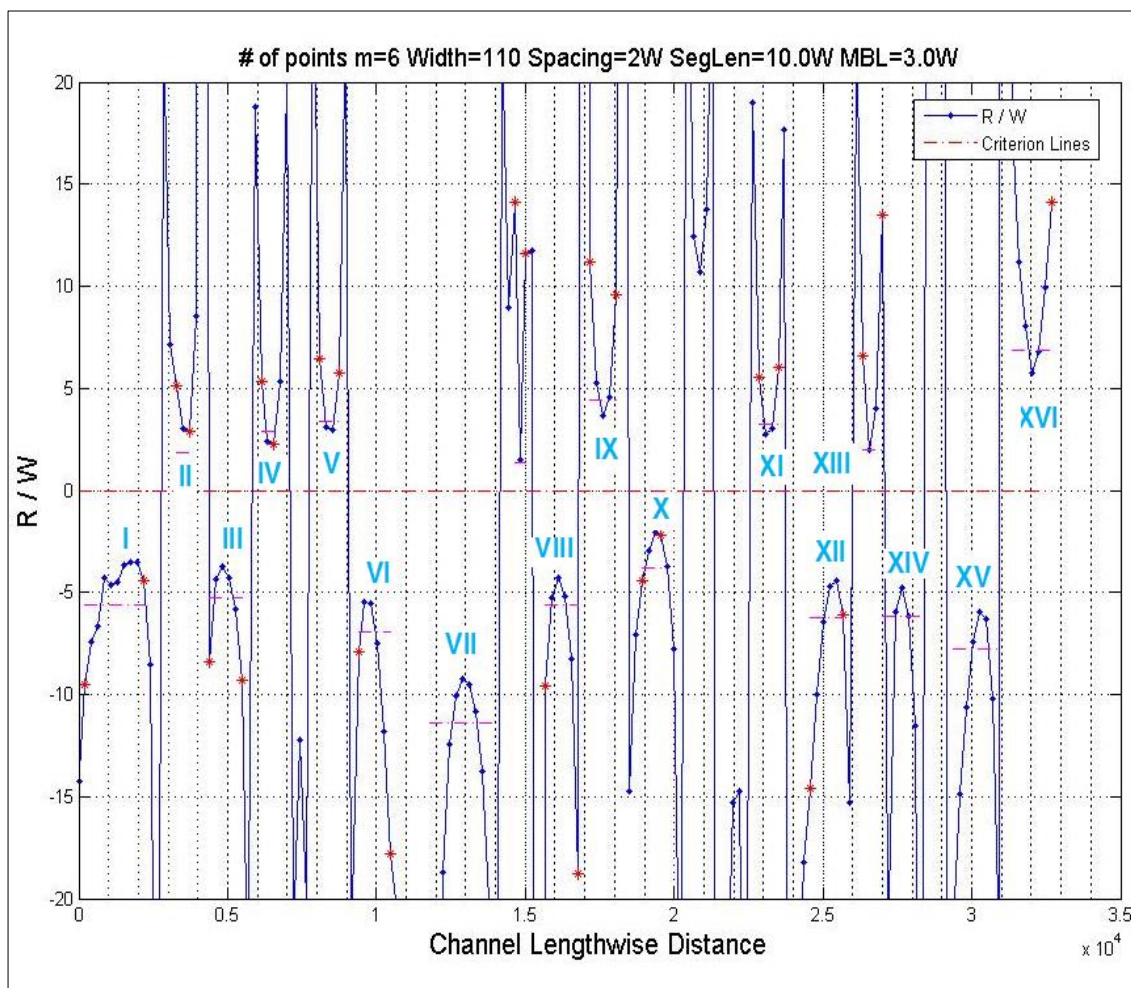


Figura 152. Relación radio de curvatura y ancho de canal para el río Sinú en el año 2005.

En la Tabla 8, se observan los radios de curvatura en relación con el ancho del meandro para el año 2005, incrementaron su valor promedio en 5.32.

Tabla 42. Valores de R_c/W para cada curvatura del río Sinú 2005.

curva	R_c/W
I	5,6
II	2
III	5,3
IV	3,6
V	4
VI	7
VII	11
VIII	5,6
IX	4,6
X	4
XI	3,6
XII	6
XIII	2,6
XIV	6
XV	7,3
XVI	7

ANEXO 6:
POTENCIAL EROSIVO
HISTORICO SOBRE EL
RÍO SINÚ

1. Análisis de erosión para el río Sinú.

La relación radio de la curvatura (R_c) y el ancho de la superficie libre del agua (W) permite analizar el grado de erosión en curvas, los valores obtenidos permiten identificar las curvaturas con mayor actividad en el trazado.

- **Potencial erosivo en las márgenes para el río Sinú en 1961.**

El análisis geométrico indica que todas las curvaturas del río presentan un potencial erosivo cercano a 0.5 m/año, tal como se observa en la Tabla 1.

Tabla 43. Potencial erosivo en las márgenes río Sinú 1961

curva	R_c/W	$T.E/M$
I	5,4	0,463
II	4,6	0,543
III	8,7	0,287
IV	4,3	0,581
V	4,6	0,543
VI	4,3	0,581
VII	4,6	0,543
VIII	4,8	0,521
IX	5	0,500
X	3,6	0,694
XI	4,8	0,521
XII	4,6	0,543
XIII	4,8	0,521
XIV	5	0,500
XV	4,8	0,521
XVI	4,8	0,521
XVII	4,8	0,521
XVIII	4,6	0,543

- **Potencial de erosión de fondo en curvas para el río Sinú en 1961.**

La mayoría de curvas presentan procesos muy similares en erosión de fondo. La Tabla 2, indica las curvaturas con mayor potencial erosivo de fondo para el río Sinú en 1961.

Tabla 44. Potencial erosivo de fondo en curvas del río Sinú 1961

Curva	Rc/w	Thorne	Altuin-1	USACE-Arenas	Promedio
I	5,4	1,837	3,426	2,263	2,509
II	4,6	1,888	3,455	2,369	2,571
III	8,7	1,709	3,341	1,948	2,332
IV	4,3	1,912	3,467	2,413	2,598
V	4,6	1,888	3,455	2,369	2,571
VI	4,3	1,912	3,467	2,413	2,598
VII	4,6	1,888	3,455	2,369	2,571
VIII	4,8	1,874	3,448	2,341	2,554
IX	5	1,861	3,440	2,314	2,538
X	3,6	1,981	3,499	2,531	2,670
XI	4,8	1,874	3,448	2,341	2,554
XII	4,6	1,888	3,455	2,369	2,571
XIII	4,8	1,874	3,448	2,341	2,554
XIV	5	1,861	3,440	2,314	2,538
XV	4,8	1,874	3,448	2,341	2,554
XVI	4,8	1,874	3,448	2,341	2,554
XVII	4,8	1,874	3,448	2,341	2,554
XVIII	4,6	1,888	3,455	2,369	2,571

- **Potencial erosivo en las márgenes para el río Sinú en 1981.**

El potencial erosivo en las curvaturas del río Sinú para el año 1981, presenta una fuerte actividad en 8 de las 18 curvaturas caracterizadas con valores superiores a 0.5 m/año, el mayor potencial de erosión en márgenes se localiza en las curvas VI, VII, VIII, X, XII y XV. Sin embargo, en las curvaturas restantes el potencial erosivo es muy pequeño con valores cercanos a 0.25 m/año, tal como se observa en la Tabla 3.

Tabla 45. Potencial erosivo en las márgenes del río Sinú en el año 1981.

curva	Rc/W	T.E/M
I	4,3	0,581
II	11	0,227
III	7,6	0,329
IV	5,3	0,472
V	6	0,417
VI	3	0,833
VII	3,6	0,694
VIII	4	0,625
IX	5	0,500
X	3,6	0,694
XI	5,3	0,472
XII	4	0,625
XIII	5	0,500
XIV	6,6	0,379
XV	3,6	0,694
XVI	7,6	0,329
XVII	7	0,357
XVIII	9,6	0,260

- **Potencial de erosión de fondo en curvas para el río Sinú en 1981.**

La mayoría de curvas presentan procesos muy similares en erosión de fondo. La Tabla 4, indica que el potencial de erosión en fondo es mayor en la curva VI y menor en las curvas II y XVIII.

Tabla 46. Potencial erosivo de fondo en curvas para el río Sinú en el año 1981.

Curva	Rc/w	Thorne	Altuin-1	USACE-Arenas	Promedio
I	4,3	1,912	3,467	2,413	2,598
II	11	1,653	3,298	1,793	2,248
III	7,6	1,743	3,365	2,037	2,382
IV	5,3	1,843	3,430	2,275	2,516
V	6	1,807	3,407	2,193	2,469
VI	3	2,070	3,532	2,651	2,751
VII	3,6	1,981	3,499	2,531	2,670
VIII	4	1,938	3,480	2,461	2,627
IX	5	1,861	3,440	2,314	2,538
X	3,6	1,981	3,499	2,531	2,670
XI	5,3	1,843	3,430	2,275	2,516
XII	4	1,938	3,480	2,461	2,627
XIII	5	1,861	3,440	2,314	2,538
XIV	6,6	1,780	3,390	2,131	2,434
XV	3,6	1,981	3,499	2,531	2,670
XVI	7,6	1,743	3,365	2,037	2,382
XVII	7	1,764	3,380	2,092	2,412
XVIII	9,6	1,685	3,323	1,883	2,297

- **Potencial erosivo en las márgenes para el río Sinú en 1988.**

Tal como se indica en la Tabla 5, la erosión en márgenes se acentúa con mayor potencial en las curvas I, IV, VI y IX, con valores superiores a 0.5 m/año. Las curvaturas restantes presentan valores cercanos a 0.2 m/año para este indicador.

Tabla 47. Potencial erosivo en las márgenes del río Sinú en el año 1988.

curva	Rc/W	T.E/M
I	5	0,500
II	6	0,417
III	14	0,179
IV	5	0,500
V	9	0,278
VI	4	0,625
VII	14	0,179
VIII	7	0,357
IX	4	0,625
X	5,3	0,472
XI	6,3	0,397
XII	15,3	0,163

- **Potencial de erosión de fondo en curvas**

La erosión en fondo se presenta con mayor intensidad en las curvas VI y IX. Sin embargo, los valores de erosión de fondo en las curvas restantes son muy cercanos, indicador de un proceso erosivo activo e importante.

Tabla 48. Potencial de fondo en curvas del río Sinú en el año 1988.

Curva	Rc/w	Thorne	Altuin-1	USACE-Arenas	Promedio
I	5	1,861	3,440	2,314	2,538
II	6	1,807	3,407	2,193	2,469
III	14	1,598	3,255	1,634	2,162
IV	5	1,861	3,440	2,314	2,538
V	9	1,700	3,334	1,926	2,320
VI	4	1,938	3,480	2,461	2,627
VII	14	1,598	3,255	1,634	2,162
VIII	7	1,764	3,380	2,092	2,412
IX	4	1,938	3,480	2,461	2,627
X	5,3	1,843	3,430	2,275	2,516
XI	6,3	1,793	3,399	2,161	2,451
XII	15,3	1,578	3,239	1,576	2,131

- **Potencial erosivo en las márgenes para el río Sinú en 1994.**

Cuanto más cerrada es una curva mayor es la erosión en el margen, las curvas con mayor potencial de erosión son las II, V, VII y XIII, tal como se indica en la Tabla 7. En general, las curvaturas presentan un potencial de erosión en márgenes cercano a 0.5 m/año, a excepción de las curvaturas I, VI y XIV con valores de 0.2 m/año

Tabla 49. Potencial erosivo en las márgenes río Sinú 1994

curva	Rc/W	T.E/M
I	10	0,250
II	4,3	0,581
III	4,66	0,536
IV	7,3	0,342
V	4	0,625
VI	9,3	0,269
VII	4,3	0,581
VIII	4,5	0,556
IX	5	0,500
X	4,5	0,556
XI	4,5	0,556
XII	4,5	0,556
XIII	4,3	0,581
XIV	9	0,278
XV	8,3	0,301

- **Potencial de erosión de fondo en curvas para el río Sinú en 1994.**

La Tabla 8, indica un comportamiento similar para la erosión del fondo en las curvaturas del río Sinú en 1994, la erosión en fondo se presenta con menor intensidad en las curvas I, VI y XIV. De igual forma, se presentan procesos de erosión en fondo muy activos en las curvas restantes

Tabla 50. Potencial erosivo de fondo en curvas del río Sinú 1994

Curva	Rc/w	Thorne	Altuin-1	USACE-Arenas	Promedio
I	10	1,675	3,316	1,856	2,282
II	4,3	1,912	3,467	2,413	2,598
III	4,66	1,884	3,453	2,360	2,566
IV	7,3	1,753	3,372	2,064	2,396
V	4	1,938	3,480	2,461	2,627
VI	9,3	1,692	3,329	1,904	2,308
VII	4,3	1,912	3,467	2,413	2,598
VIII	4,5	1,896	3,459	2,383	2,579
IX	5	1,861	3,440	2,314	2,538
X	4,5	1,896	3,459	2,383	2,579
XI	4,5	1,896	3,459	2,383	2,579
XII	4,5	1,896	3,459	2,383	2,579
XIII	4,3	1,912	3,467	2,413	2,598
XIV	9	1,700	3,334	1,926	2,320
XV	8,3	1,720	3,349	1,979	2,350

- **Potencial erosivo en las márgenes del río Sinú en el año 1999.**

En la Tabla 9, se observa que el potencial de erosión en las márgenes es muy activo sobre las curvaturas IV, V, VII y XIV con valores cercanos 0.7 m/año, para las curvaturas restantes el potencial de erosión en las márgenes es aproximadamente de 0.5 m/año.

Tabla 51. Potencial erosivo en las márgenes del río Sinú en el año 1999.

curva	Rc/W	T.E/M
I	7,6	0,329
II	6	0,417
III	4,6	0,543
IV	3,6	0,694
V	3,6	0,694
VI	6	0,417
VII	3,6	0,694
VIII	7,3	0,342
IX	5,3	0,472
X	5	0,500
XI	4,6	0,543
XII	4,3	0,581
XIII	4,3	0,581
XIV	3,6	0,694
XV	9	0,278
XVI	5	0,500

- **Potencial de erosión de fondo en curvas para el río Sinú en 1999.**

La erosión en fondo en las curvaturas del río sinú para el año de 1999, se presenta con mayor intensidad en las curvas IV, V, VII y XIV, el proceso de erosión es igual de significativo en las curvaturas restantes pero con un potencial menor, tal como se observa en la Tabla 10.

Tabla 52. Potencial de fondo en curvas del río Sinú en el año 1999.

Curva	Rc/w	Thorne	Altuin-1	USACE-Arenas	Promedio
I	7,6	1,743	3,365	2,037	2,382
II	6	1,807	3,407	2,193	2,469
III	4,6	1,888	3,455	2,369	2,571
IV	3,6	1,981	3,499	2,531	2,670
V	3,6	1,981	3,499	2,531	2,670
VI	6	1,807	3,407	2,193	2,469
VII	3,6	1,981	3,499	2,531	2,670
VIII	7,3	1,753	3,372	2,064	2,396
IX	5,3	1,843	3,430	2,275	2,516
X	5	1,861	3,440	2,314	2,538
XI	4,6	1,888	3,455	2,369	2,571
XII	4,3	1,912	3,467	2,413	2,598
XIII	4,3	1,912	3,467	2,413	2,598
XIV	3,6	1,981	3,499	2,531	2,670
XV	9	1,700	3,334	1,926	2,320
XVI	5	1,861	3,440	2,314	2,538

- **Potencial erosivo en las márgenes para el río Sinú en 2002.**

Las curvaturas que presentan un potencial de erosión en márgenes significativo son las IV, VI, XI, XII y XIII, con valores aproximados de 0.7 m/año, tal como se indica en la Tabla 11. Las curvas VII y XIV presentan un menor potencial y sus valores oscilan entre los 0.2 m/año y 0.3 m/año.

Tabla 53. Potencial erosivo en las márgenes río Sinú 2002

curva	Rc/W	T.E/M
I	7	0,357
II	6,3	0,397
III	4,6	0,543
IV	3,6	0,694
V	5,3	0,472
VI	3,6	0,694
VII	7	0,357
VIII	6,3	0,397
IX	5	0,500
X	4,6	0,543
XI	4,3	0,581
XII	4,3	0,581
XIII	3,6	0,694
XIV	9	0,278
XV	5	0,500

- **Potencial de erosión de fondo en curvas para el río Sinú en 2002.**

La Tabla 12, indica un comportamiento similar en las curvaturas del río Sinú para la erosión del fondo en el año 2002, la erosión máxima se presenta en las curvas IV, VI, XI, XII y XIII. De igual forma, se presentan procesos de erosión en fondo muy activos en las curvas restantes.

Tabla 54. Potencial erosivo de fondo en curvas del río Sinú 2002

Curva	Rc/w	Thorne	Altuin-1	USACE-Arenas	Promedio
I	7	1,764	3,380	2,092	2,412
II	6,3	1,793	3,399	2,161	2,451
III	4,6	1,888	3,455	2,369	2,571
IV	3,6	1,981	3,499	2,531	2,670
V	5,3	1,843	3,430	2,275	2,516
VI	3,6	1,981	3,499	2,531	2,670
VII	7	1,764	3,380	2,092	2,412
VIII	6,3	1,793	3,399	2,161	2,451
IX	5	1,861	3,440	2,314	2,538
X	4,6	1,888	3,455	2,369	2,571
XI	4,3	1,912	3,467	2,413	2,598
XII	4,3	1,912	3,467	2,413	2,598
XIII	3,6	1,981	3,499	2,531	2,670
XIV	9	1,700	3,334	1,926	2,320
XV	5	1,861	3,440	2,314	2,538

- **Potencial erosivo en las márgenes para el río Sinú en 2004.**

La Tabla 13, indica que las tasas de erosión en las curvaturas del río presentan un potencial erosivo cercano a 0.5m/año. Sin embargo, las curvaturas IX y XVI presentan un potencial erosivo de 0.25 m/año, lo que representa mayor estabilidad.

Tabla 55. Potencial erosivo en las márgenes río Sinú 2004

curva	Rc/W	T.E/M
I	7	0,357
II	4	0,625
III	6	0,417
IV	4,3	0,581
V	4,3	0,581
VI	4,3	0,581
VII	7	0,357
VIII	4	0,625
IX	10,3	0,243
X	3,6	0,694
XI	5	0,500
XII	4,3	0,581
XIII	4,3	0,581
XIV	4,3	0,581
XV	4	0,625
XVI	10	0,250
XVII	5	0,500

- **Potencial de erosión de fondo en curvas para el río Sinú en 2004**

El potencial de erosión en fondo en todas las curvaturas es activo. Sin embargo, en las curvaturas IX y XVI, el proceso erosivo se produce con menor intensidad, tal como se observa en la Tabla 14.

Tabla 56. Potencial erosivo de fondo en la curvas río Sinú 2004.

Curva	Rc/w	Thorne	Altuin-1	USACE-Arenas	Promedio
I	7	1,764	3,380	2,092	2,412
II	4	1,938	3,480	2,461	2,627
III	6	1,807	3,407	2,193	2,469
IV	4,3	1,912	3,467	2,413	2,598
V	4,3	1,912	3,467	2,413	2,598
VI	4,3	1,912	3,467	2,413	2,598
VII	7	1,764	3,380	2,092	2,412
VIII	4	1,938	3,480	2,461	2,627
IX	10,3	1,668	3,310	1,837	2,272
X	3,6	1,981	3,499	2,531	2,670
XI	5	1,861	3,440	2,314	2,538
XII	4,3	1,912	3,467	2,413	2,598
XIII	4,3	1,912	3,467	2,413	2,598
XIV	4,3	1,912	3,467	2,413	2,598
XV	4	1,938	3,480	2,461	2,627
XVI	10	1,675	3,316	1,856	2,282
XVII	5	1,861	3,440	2,314	2,538

- **Potencial erosivo en las márgenes para el río Sinú en 2005.**

La erosión en márgenes se acentúa con un potencial erosivo mayor de 0.7 m/año en las curvas II, IV, V, X, XI y XIII, tal como se indica en la Tabla 15. De igual forma, el potencial erosivo en las márgenes de la curva VII, es pequeño con un valor de 0.2 m/año.

Tabla 57. Potencial erosivo en las márgenes del río Sinú en el año 2005.

curva	Rc/W	T.E/M
I	5,6	0,446
II	2	0,670
III	5,3	0,472
IV	3,6	0,694
V	4	0,625
VI	7	0,357
VII	11	0,227
VIII	5,6	0,446
IX	4,6	0,543
X	4	0,625
XI	3,6	0,694
XII	6	0,417
XIII	2,6	1,072
XIV	6	0,417
XV	7,3	0,342
XVI	7	0,357

- **Potencial de erosión de fondo en curvas para el río Sinú en 2005.**

La Tabla 16, indica un comportamiento similar en las curvaturas del río Sinú para la erosión del fondo en el año 2005, la erosión máxima se presenta en las curvas IV, VI, XI, XII y XIII. De igual forma, se presentan procesos de erosión en fondo muy activos en las curvas restantes.

Tabla 58. Potencial de fondo en curvas del río Sinú en el año 2005.

Curva	Rc/w	Thorne	Altuin-1	USACE- Arenas	Promedio
I	5,6	1,827	3,420	2,239	2,495
II	2	6,882	3,605	2,919	4,469
III	5,3	1,843	3,430	2,275	2,516
IV	3,6	1,981	3,499	2,531	2,670
V	4	1,938	3,480	2,461	2,627
VI	7	1,764	3,380	2,092	2,412
VII	11	1,653	3,298	1,793	2,248
VIII	5,6	1,827	3,420	2,239	2,495
IX	4,6	1,888	3,455	2,369	2,571
X	4	1,938	3,480	2,461	2,627
XI	3,6	1,981	3,499	2,531	2,670
XII	6	1,807	3,407	2,193	2,469
XIII	2,6	2,167	3,558	2,745	2,823
XIV	6	1,807	3,407	2,193	2,469
XV	7,3	1,753	3,372	2,064	2,396
XVI	7	1,764	3,380	2,092	2,412

ANEXO 7:

ESTIMACION DE MODELOS NO LINEALES

1. MODELOS ESTADISTICOS DE REGRESION NO LINEAL

Las hipótesis planteada en los modelos estadísticos se enfocan en determinar el comportamiento de variables independientes tales como el factor de migración lateral, la sinuosidad y la diferencia relativa, a través de la caracterización del régimen hidrológico, lo que permite generar modelos de estimación para los indicadores morfológicos asociados con las variaciones en el régimen hidrológico del río Sinú.

1.1. Modelos estadísticos para el factor de migración lateral.

Los modelos estadísticos planteados para el factor de migración lateral, se determinan a través del comportamiento de las variables independientes. A continuación, se esgrimen los modelos estadísticos preseleccionados que mejor simulan el comportamiento del factor de migración lateral en las condiciones planteadas.

1.1.1. Modelo estadístico tipo potencial.

La hipótesis del modelo estadístico planteado, indica que el factor de migración lateral (FML) depende de la variable tasa de descenso de caudal (TDC), bajo un comportamiento potencial. Por lo tanto, el modelo estadístico preseleccionado presenta la siguiente función a estimar:

$$FML = A * TDC^B \quad (1)$$

A continuación, los resultados en la estimación de los parámetros, aplicando el método de Montecarlo.

1.1.1.1. Estimación de parámetros aplicando Montecarlo.

Los valores semillas para las variables desconocidas, son $A=0.0105$ y $B=0.0851$, los cuales se encuentra dentro del intervalo establecido para cada variable, tal como se indica en la Tabla 1.

Tabla 59. Estimación de estadísticos para valores semilla.

	min	max		semilla		corridas	1000
A	0	0,015		0,010			
B	0,5	2		1,706			
C	0	0		0			

FMLobsmed	0,34864167				SSE	SSR			
TDC	FML	FML calc	(FMLobs-FMLcalc)^2	(FMLcal-FMLprom)^2	ERROR 1	ERROR 2	SST	R2	1-R2
66,55	0,378	12,948	158,00	158,74	664,27	665,23	1329,51	0,50	0,50
53,14	0,294	8,820	72,68	71,76					
46,33	0,290	6,979	44,75	43,97					
67,13	0,382	13,139	162,74	163,60					
61,00	0,374	11,160	116,34	116,89					
60,00	0,373	10,850	109,75	110,27					

Se realizaron 1000 corridas para la estimación de los parámetros, aplicando el método de Montecarlo, tal como se indica en la Tabla 2.

Tabla 60. Parámetros seleccionados del modelo estadístico tipo potencial

R2	1-R2	A	B
0,8607	0,1294	0,011	0,852

En la Figura 1, podemos observar el comportamiento del parámetro A determinado por simulación de Montecarlo, la dispersión de los datos presenta una tendencia definida.

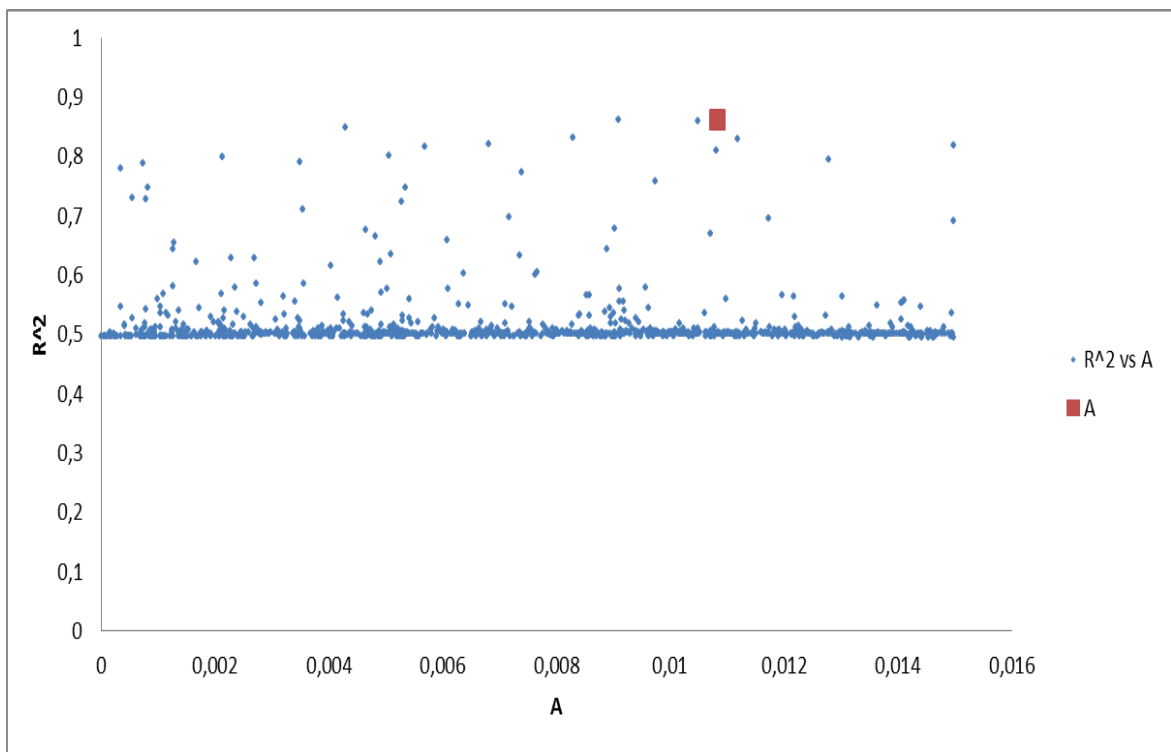


Figura 153. Comportamiento del parámetro A en Montecarlo.

En la Figura 2, podemos observar el comportamiento del parámetro B determinado por simulación de Montecarlo, la dispersión de los datos muestra la aleatoriedad de los mismos, sin tendencia definida.

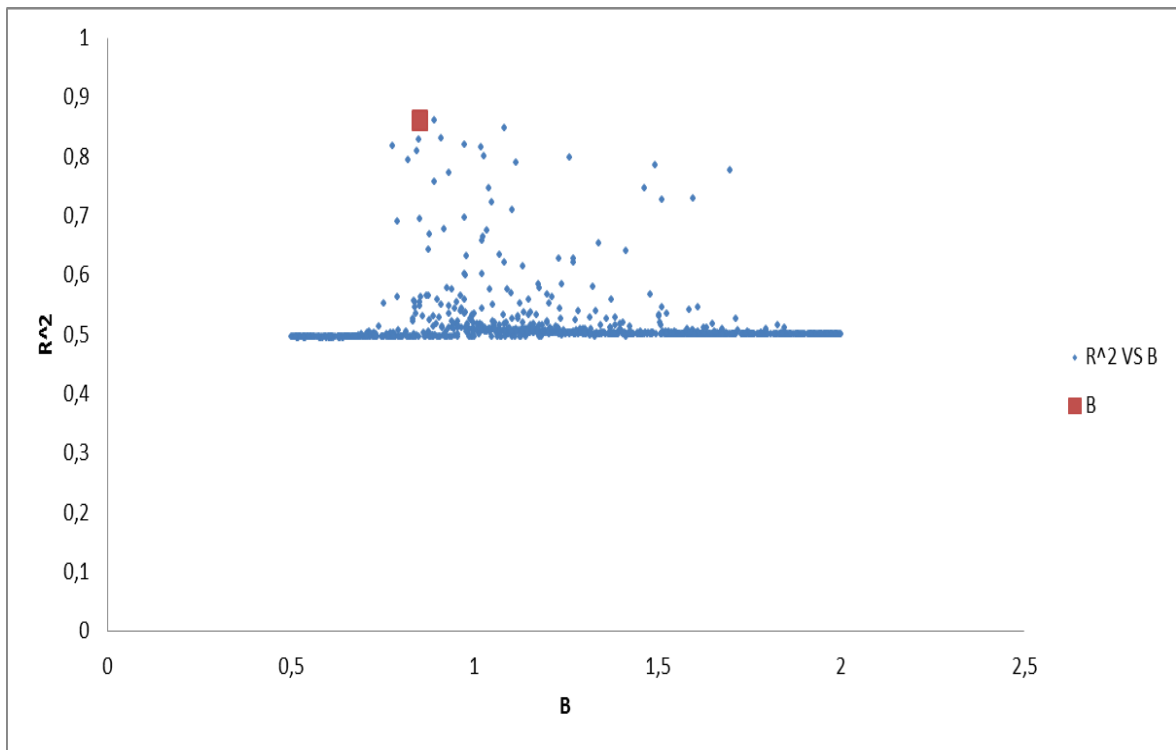


Figura 154. Comportamiento del parámetro B en Montecarlo.

1.1.1.2. Análisis de varianza

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión no lineal para describir la relación entre FML y 1 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es:

$$FML = 0,011 * TDC^{0,852} \quad (2)$$

Se determinan los estadísticos para el modelo tipo potencial del factor de migración lateral (FML), tal como se observa en la Tabla 3.

Tabla 61. ANOVA del modelo tipo potencial del FML

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>
Modelo	0,737645	2	0,368822
Residuo	0,00138318	4	0,0003458
Total	0,739028	6	
Total (Corr.)	0,00972338	5	
R-Cuadrada = 85,7747 porciento			
R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 82,2184 porcien			
Error estándar del est. = 0,0185956			
Error medio absoluto = 0,0134358			
Estadístico Durbin-Watson = 1,35493			
Auto correlación residual de retardo 1 = 0,158729			

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajusta el 85,7% de la variabilidad en FML. Por su parte, el estadístico R-Cuadrada ajustada es de 82,2%. En el análisis de los errores, el error estándar muestra que la desviación de los residuos es 0,018 y el error absoluto medio (MAE) considerado el valor promedio de los residuos es de 0,013.

1.1.1.3. Análisis de residuos

Los residuos no presentan tendencias, ni curvas en la gráfica y la dispersión vertical de los datos no varía mucho con la horizontal, tal como se observa en la Figura 3.

Gráfica de Residuos

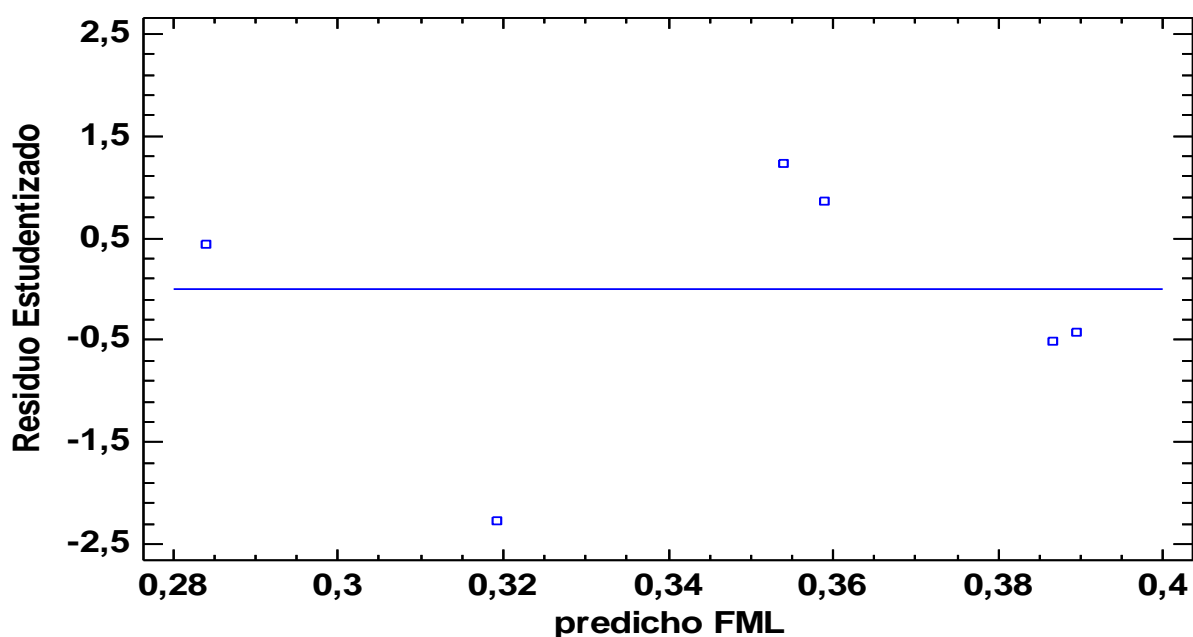


Figura 155. Análisis de residuos para el modelo potencial del factor de migración lateral.

1.1.1.4. Tasas de variación

Las tasas de variación establecidas para el factor de migración lateral, permiten inferir a través del diagrama de Theil si los datos obtenidos se encuentran sobre estimados o subestimados. La Tabla 4, indican las tasa de variación de los resultados teóricos y los estimados a través del modelo estadístico.

Tabla 62. Tasa de variación para el factor de migración lateral.

TDC	FML- TEORICO	FML- ESTADISTICO	TASAS DE VARIACION	
			%M TEORICO	% M ESTIMADO
66,55	0,3782	0,387		
53,14	0,2942	0,319	-28,53	-21,13
46,33	0,2896	0,284	-1,60	-12,39
67,125	0,3824	0,389	24,27	27,08
61	0,3740	0,359	-2,25	-8,49
60	0,3735	0,354	-0,14	-1,42
			U de Theil	0,197

El indicador U de Theil registra un valor de 0.197, lo que indica un 20% en la bondad del ajuste sobre la predicción. En la Figura 4, se observa el diagrama de Theil para el modelo potencial del factor de migración lateral.

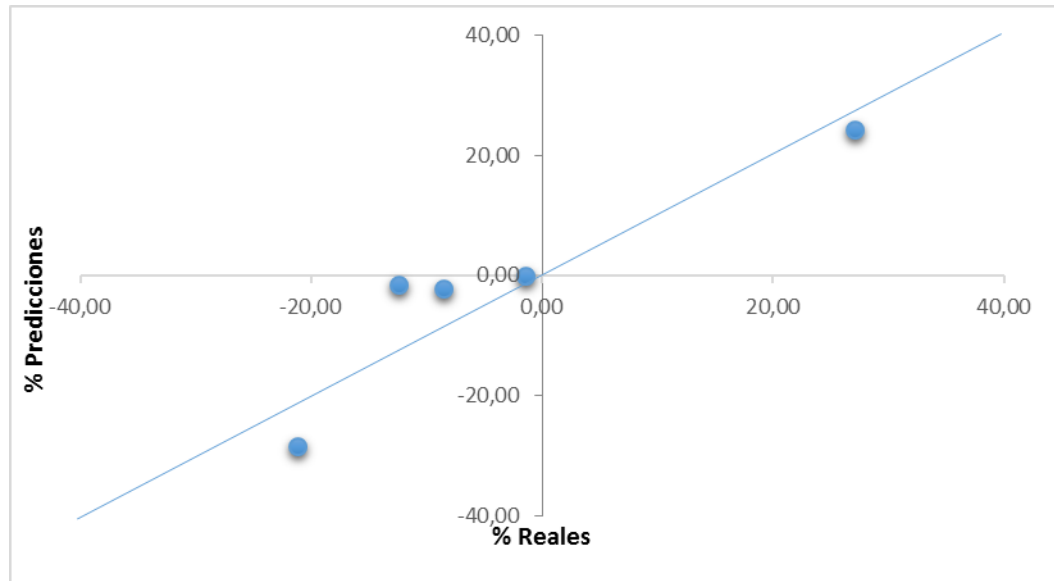


Figura 156. Diagrama de predicción- realización de Theil para el modelo potencial del FML.

1.1.1.5. Intervalos de predicción.

Los intervalos de predicción con un 90% de confianza, se establecen para el modelo estadístico tipo potencial del factor de migración lateral (FML), tal como se indica en la Figura 5.

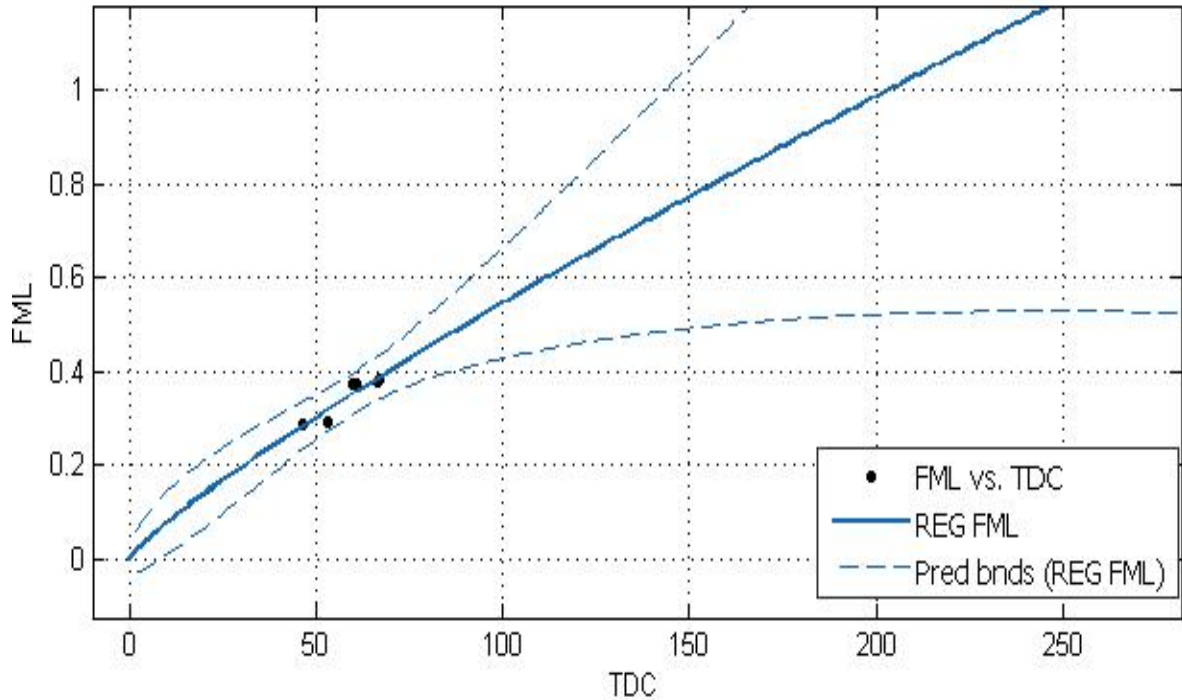


Figura 157. Intervalos de predicción para el modelo tipo potencial del FML.

1.1.2. Modelo estadístico tipo exponencial.

La hipótesis del modelo estadístico planteado, indica que el factor de migración lateral (FML) depende de la variable tasa de descenso de caudal (TDC), bajo un comportamiento exponencial. Por lo tanto, el modelo estadístico preseleccionado presenta la siguiente función a estimar:

$$FML = A * \exp(B * TDC) \quad (3)$$

A continuación, los resultados en la estimación de los parámetros, aplicando el método de Montecarlo.

1.1.2.1. Estimación de parámetros aplicando Montecarlo.

Los valores semillas para las variables desconocidas, son $A=0.01419$ y $B=0.01484$, los cuales se encuentra dentro del intervalo establecido para cada variable, tal como se indica en la Tabla 5.

Tabla 63. Estimación de estadísticos para valores semilla.

	min	max		semilla
A	0,02	0,2		0,183
B	0,01	0,05		0,028
C	0	0		0

corridas	1000
----------	------

FMLobsmed	0,3486				SSE	SSR			
TDC	FML	FML calc	$(FMLobs-FMLcalc)^2$	$(FMLcal-FMLprom)^2$	ERROR 1	ERROR 2	SST	R2	1-R2
66,55	0,378	1,223	0,713	0,764	2,765	2,843	5,608	0,506	0,493
53,14	0,294	0,834	0,292	0,236					
46,33	0,289	0,687	0,158	0,114					
67,13	0,382	1,243	0,741	0,800					
61,00	0,374	1,044	0,449	0,483					
60,00	0,373	1,014	0,4113	0,443					

Se realizaron 1000 corridas para la estimación de los parámetros, aplicando el método de Montecarlo, tal como se indica en la Tabla 6.

Tabla 64. Parámetros seleccionados del modelo estadístico tipo exponencial.

R2	1-R2	A	B
0,861	0,137	0,145	0,015

En la Figura 6, se indica el comportamiento del parámetro A determinado por simulación de Montecarlo, la dispersión de los datos presenta una tendencia definida.

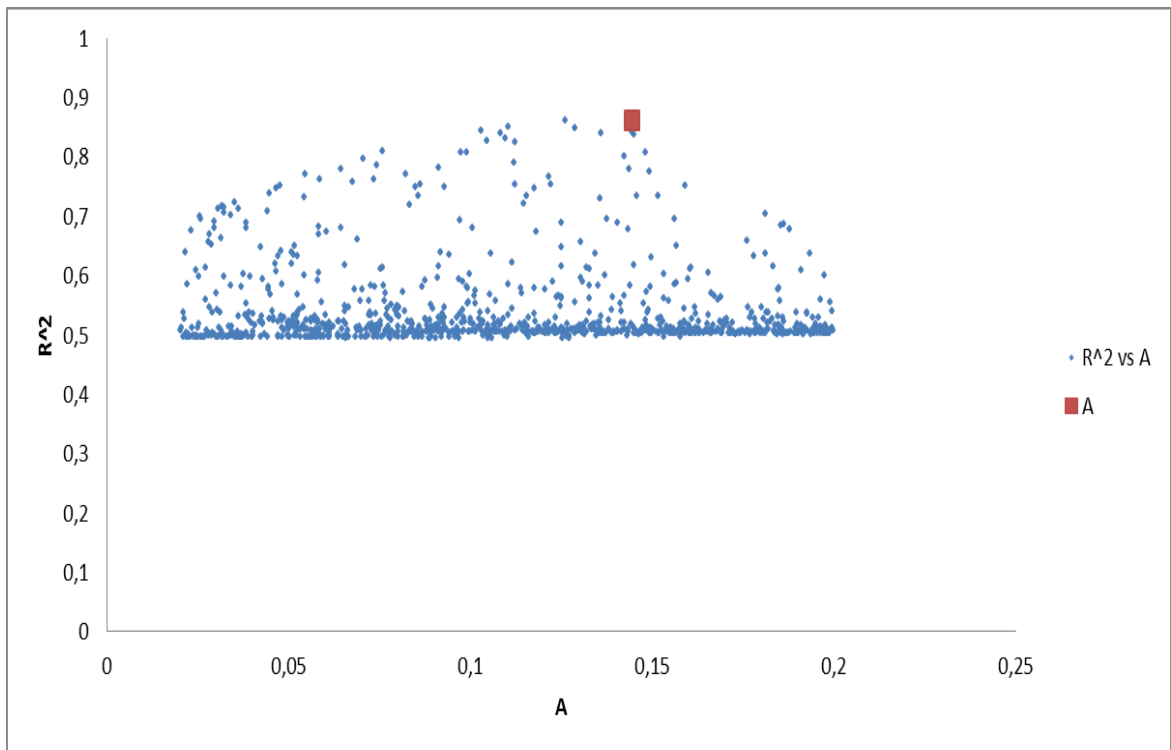


Figura 158. Comportamiento del parámetro A en Montecarlo.

En la Figura 7, se observa el comportamiento del parámetro B determinado por simulación de Montecarlo, la dispersión de los datos con tendencia ascendente.

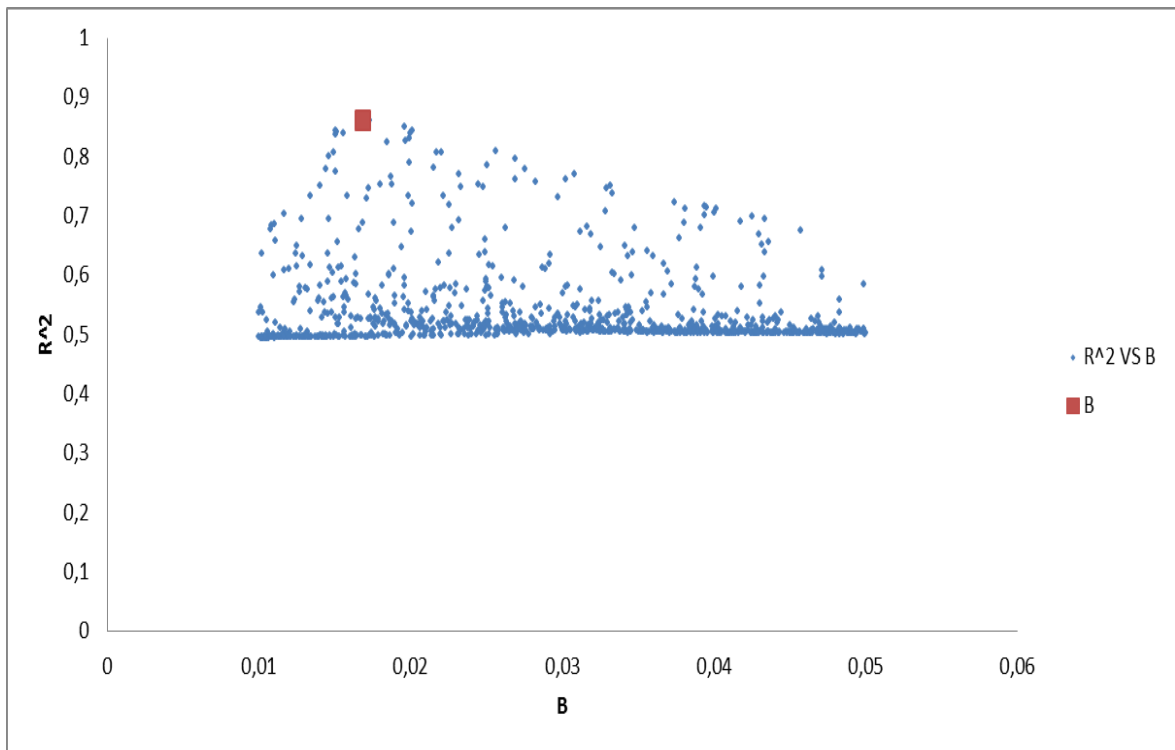


Figura 159. Comportamiento del parámetro B en Montecarlo.

1.1.2.2. Análisis de varianza

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión no lineal para describir la relación entre FML y 1 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es:

$$FML = 0,145 * EXP(0.015 * TDC) \quad (4)$$

Se determinan los estadísticos para el modelo tipo exponencial del factor de migración lateral (FML), tal como se observa en la Tabla 63.

Tabla 65. ANOVA del modelo tipo exponencial del FML

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>
Modelo	0,737545	2	0,368773
Residuo	0,00148273	4	0,0003707
Total	0,739028	6	
Total (Corr.)	0,00972338	5	
R-Cuadrada = 84,7509 porciento			
R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 80,9386 porciento			
Error estándar del est. = 0,0192531			
Error medio absoluto = 0,0137769			
Estadístico Durbin-Watson = 1,12126			
Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,249453			

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajusta el 84,7% de la variabilidad en FML. Por su parte, el estadístico R-Cuadrada ajustada es de 80,9%. En el análisis de los errores, el error estándar muestra que la desviación de los residuos es 0,019 y el error absoluto medio (MAE) considerado el valor promedio de los residuos es de 0,013.

1.1.2.3. Análisis de residuos

Los residuos no presentan tendencias, ni curvas en la gráfica y la dispersión vertical de los datos no varía mucho con la horizontal, tal como se observa en la Figura 8.

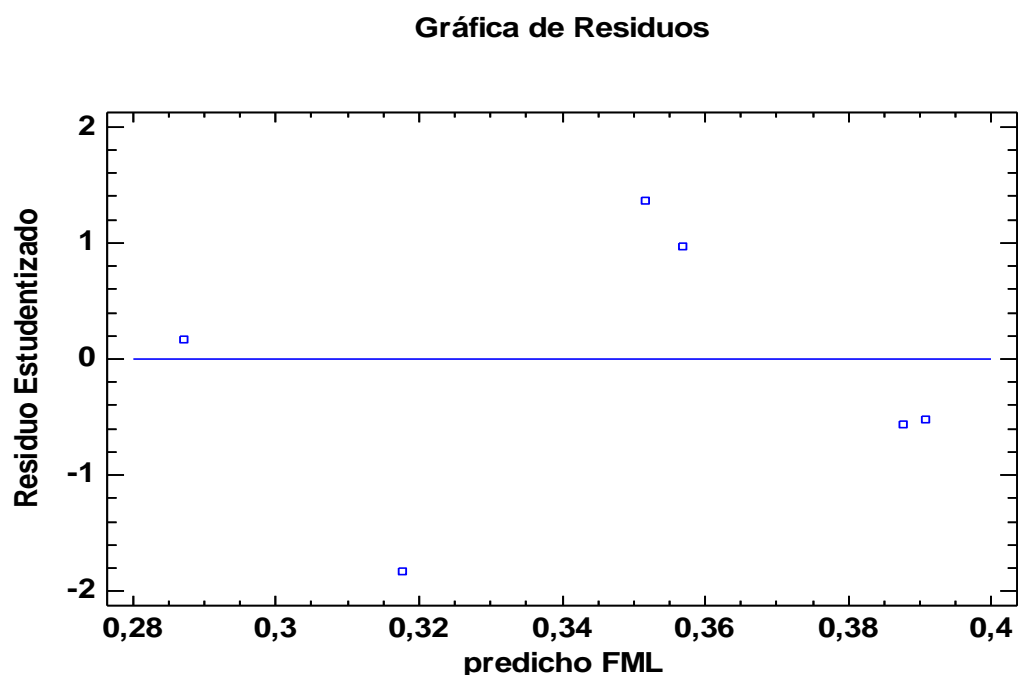


Figura 160. Análisis de residuos para el modelo exponencial del factor de migración lateral.

1.1.2.4. Tasas de variación

La Tabla 8, indican las tasa de variación de los resultados teóricos y los estimados a través del modelo estadístico tipo exponencial para el factor de migración lateral (FML).

Tabla 66. Tasa de variación para el factor de migración lateral.

TDC	FML- TEORICO	FML- ESTADISTICO	TASAS DE VARIACION	
			%M TEORICO	% M ESTIMADO
66,55	0,3782	0,388		
53,14	0,2942	0,318	-28,53	-22,02
46,33	0,2896	0,287	-1,60	-10,63
67,125	0,3824	0,391	24,27	26,55
61	0,3740	0,357	-2,25	-9,52
60	0,3735	0,352	-0,14	-1,50
			U de Theil	0,181

El indicador U de Theil registra un valor de 0.181, lo que indica un 18% en la bondad de ajuste sobre la predicción. En la Figura 9, se observa el diagrama de Theil para el modelo exponencial del factor de migración lateral.

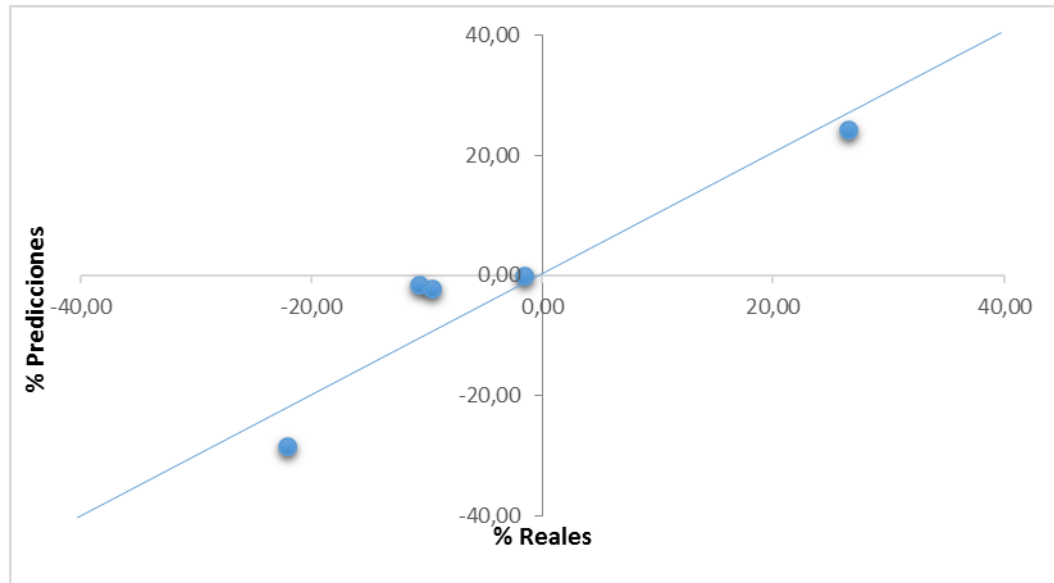


Figura 161. Diagrama de predicción- realización de Theil para el modelo exponencial del FML.

1.1.2.5. Intervalos de predicción.

Los intervalos de predicción con un 90% de confianza, se establecen para el modelo estadístico tipo exponencial del factor de migración lateral (FML), tal como se indica en la Figura 10.

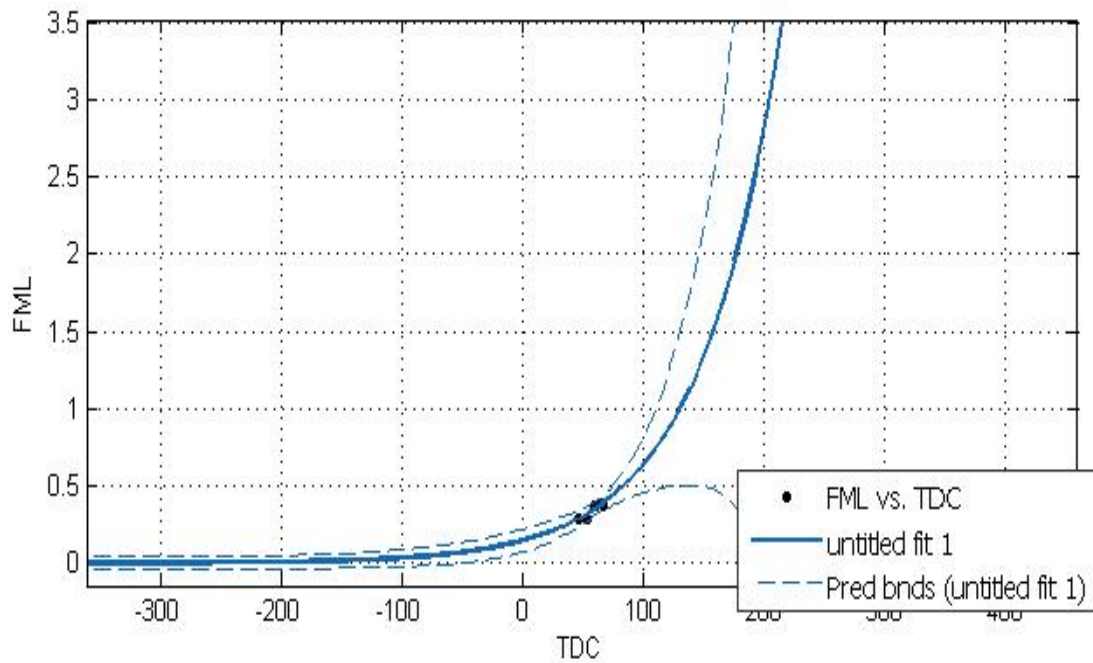


Figura 162. Intervalos de predicción para el modelo tipo exponencial del FML.

1.1.3. Modelo estadístico tipo logístico.

Teniendo en cuenta la premisa de la hipótesis, que indica una dependencia del factor de migración lateral (FML) hacia la variable tasa de descenso de caudal (TDC), se plantea un modelo empírico cuyo ensayo registra una variación en la condición de operación de la variable independiente y en los valores de la variable proceso afectada. Por lo tanto, el modelo estadístico preseleccionado presenta la siguiente función a estimar:

$$FML = \frac{\exp(A+B \cdot TDC)}{(1+\exp(A+B \cdot TDC))} \quad (5)$$

A continuación, los resultados en la estimación de los parámetros, aplicando el método de Montecarlo.

1.1.3.1. Estimación de parámetros aplicando Montecarlo.

Los valores semillas para las variables desconocidas, son $A=-1.9656$ y $B=0.02080$, los cuales se encuentra dentro del intervalo establecido para cada variable, tal como se indica en la Tabla 65.

Tabla 67. Estimación de estadísticos para valores semilla.

	min	max	semilla	corridas	1000
A	-5	0	-1,939		
B	0	0,1	0,008		
C	0	0	0		

FMLobsmed	0,34864167				SSE	SSR			
TDC	FML	FML calc	(FMLobs-FMLcalc)^2	(FMLcal-FMLprom)^2	ERROR 1	ERROR 2	SST	R2	1-R2
66,55	0,3782	0,2020	0,0310	0,0215	0,1531	0,1477	0,3008	0,4909	0,5091
53,14	0,2942	0,1842	0,0121	0,0270					
46,33	0,2896	0,1757	0,0130	0,0299					
67,13	0,3824	0,2028	0,0323	0,0213					
61,00	0,3740	0,1945	0,0322	0,0238					
60,00	0,3735	0,1932	0,0325	0,0242					

Se realizaron 1000 corridas para la estimación de los parámetros, aplicando el método de Montecarlo, tal como se indica en la Tabla 66.

Tabla 68. Parámetros seleccionados del modelo empírico.

R2	1-R2	A	B
0,8644	0,1345	-1,96	0,022

En la Figura 11, se indica el comportamiento del parámetro A determinado por simulación de Montecarlo, la dispersión de los datos presenta una tendencia definida.

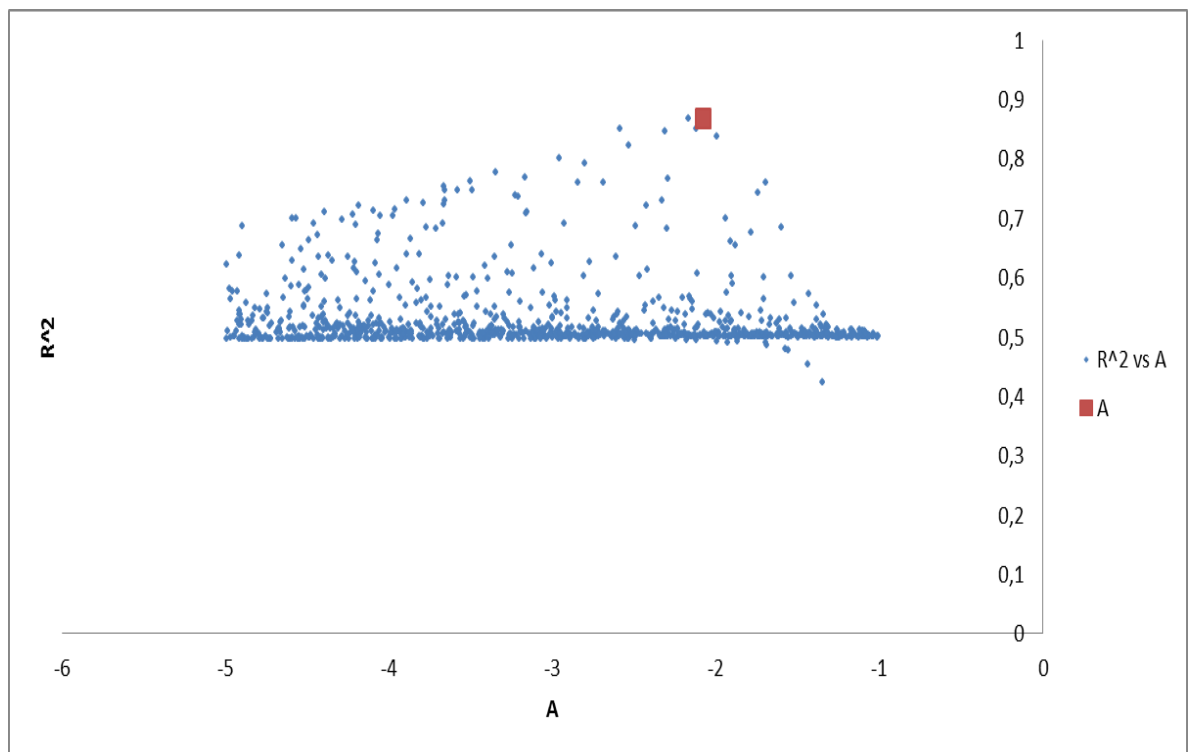


Figura 163. Comportamiento del parámetro A en Montecarlo.

En la Figura 12, se observa el comportamiento del parámetro B determinado por simulación de Montecarlo, la dispersión de los datos con tendencia ascendente.

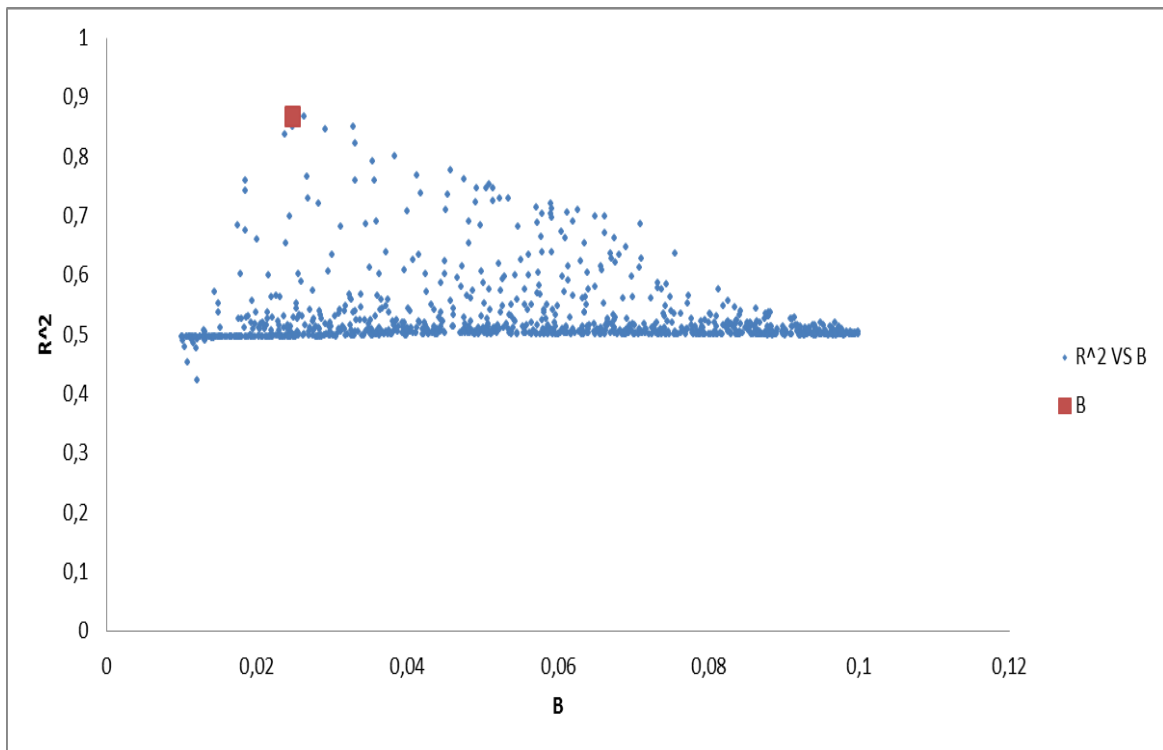


Figura 164. Comportamiento del parámetro B en Montecarlo.

1.1.3.2. Análisis de varianza

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión no lineal para describir la relación entre FML y 1 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es:

$$FML = \left(\frac{\text{EXP}(-1,96+0,022*TDC)}{1+\text{EXP}(-1,96+0,022*TDC)} \right) \quad (5)$$

Se determinan los estadísticos para el modelo empírico del factor de migración lateral (FML), tal como se observa en la Tabla 11.

Tabla 69. ANOVA del modelo empírico del FML

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>
Modelo	0,737604	2	0,368802
Residuo	0,00142377	4	0,000355943
Total	0,739028	6	
Total	0,00972338	5	
R-Cuadrada = 85,3572 porciento			
R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 81,6965 porciento			
Error estándar del est. = 0,0188665			
Error medio absoluto = 0,0136619			
Estadístico Durbin-Watson = 1,2247			
Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,206685			

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajusta el 85,3% de la variabilidad en FML. Por su parte, el estadístico R-Cuadrada ajustada es de 81,7%. En el análisis de los errores, el error estándar muestra que la desviación de los residuos es 0,018 y el error absoluto medio (MAE) considerado el valor promedio de los residuos es de 0,013.

1.1.3.3. Análisis de residuos

Los residuos no presentan tendencias, ni curvas en la gráfica y la dispersión vertical de los datos no varía mucho con la horizontal, tal como se observa en la Figura 13.

Gráfica de Residuos

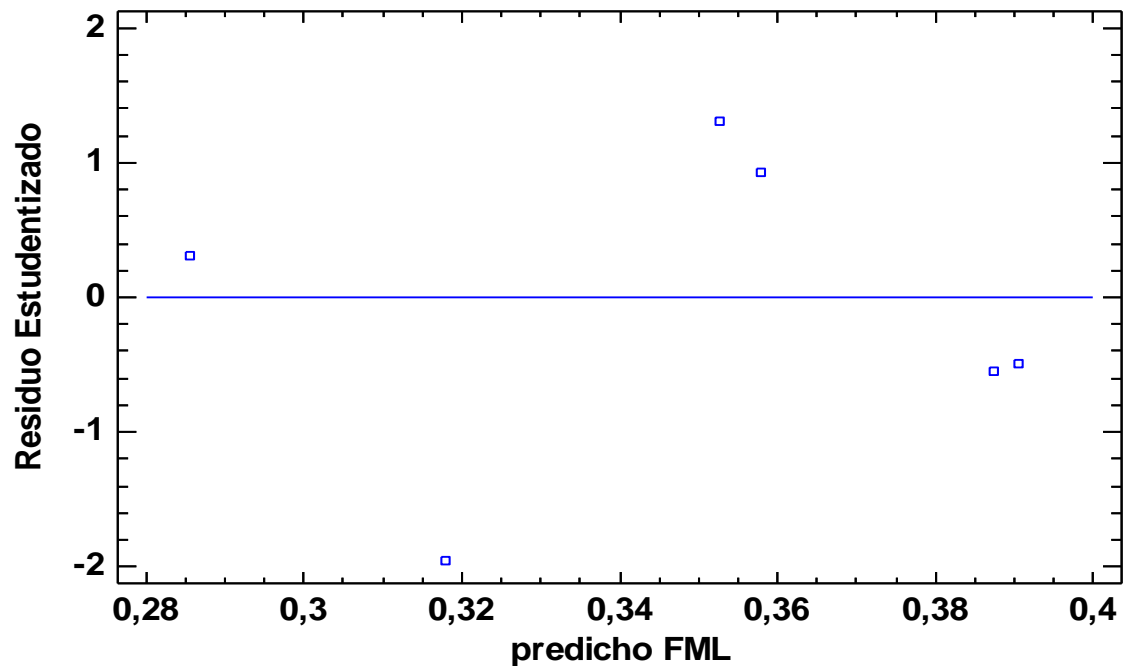


Figura 165. Análisis de residuos para el modelo empírico del factor de migración lateral.

1.1.3.4. Tasas de variación

La Tabla 12, indican las tasa de variación de los resultados teóricos y los estimados a través del modelo empírico para el factor de migración lateral (FML).

Tabla 70. Tasa de variación para el factor de migración lateral.

TDC	FML- TEORICO	FML- ESTADISTICO	TASAS DE VARIACION	
			%M TEORICO	% M ESTIMADO
66,55	0,3782	0,387		
53,14	0,2942	0,318	-28,53	-21,79
46,33	0,2896	0,286	-1,60	-11,39
67,125	0,3824	0,390	24,27	26,87
61	0,3740	0,358	-2,25	-9,09
60	0,3735	0,353	-0,14	-1,47
			U de Theil	0,187

El indicador U de Theil registra un valor de 0.187, lo que indica un 18,7% en la bondad de ajuste sobre la predicción. En la Figura 14, se observa el diagrama de Theil para el modelo empírico del factor de migración lateral.

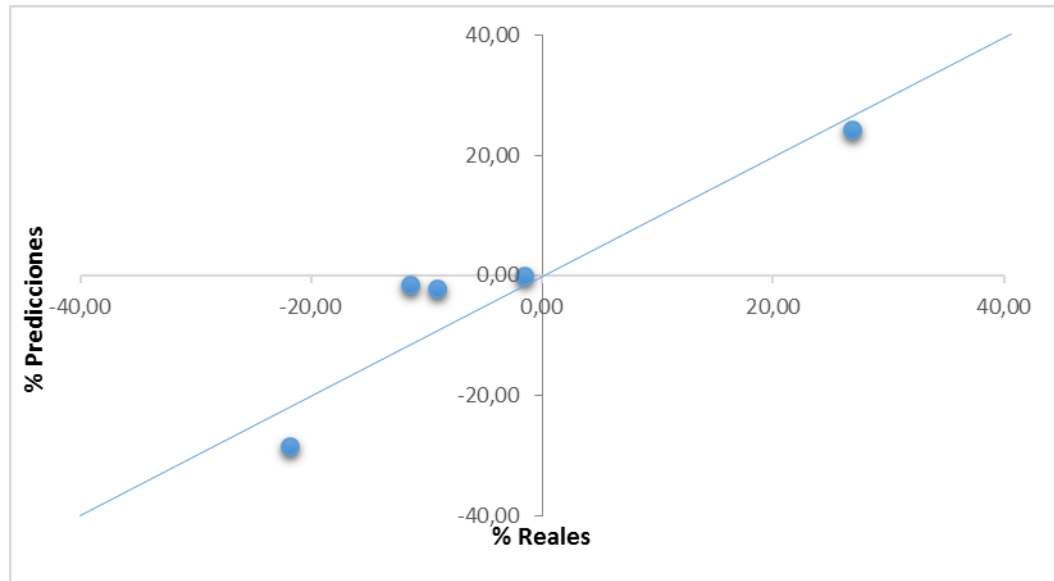


Figura 166. Diagrama de predicción- realización de Theil para el modelo empírico del FML.

1.1.3.5. Intervalos de predicción.

Los intervalos de predicción con un 90% de confianza, se establecen para el modelo empírico del factor de migración lateral (FML), tal como se indica en la Figura 15.

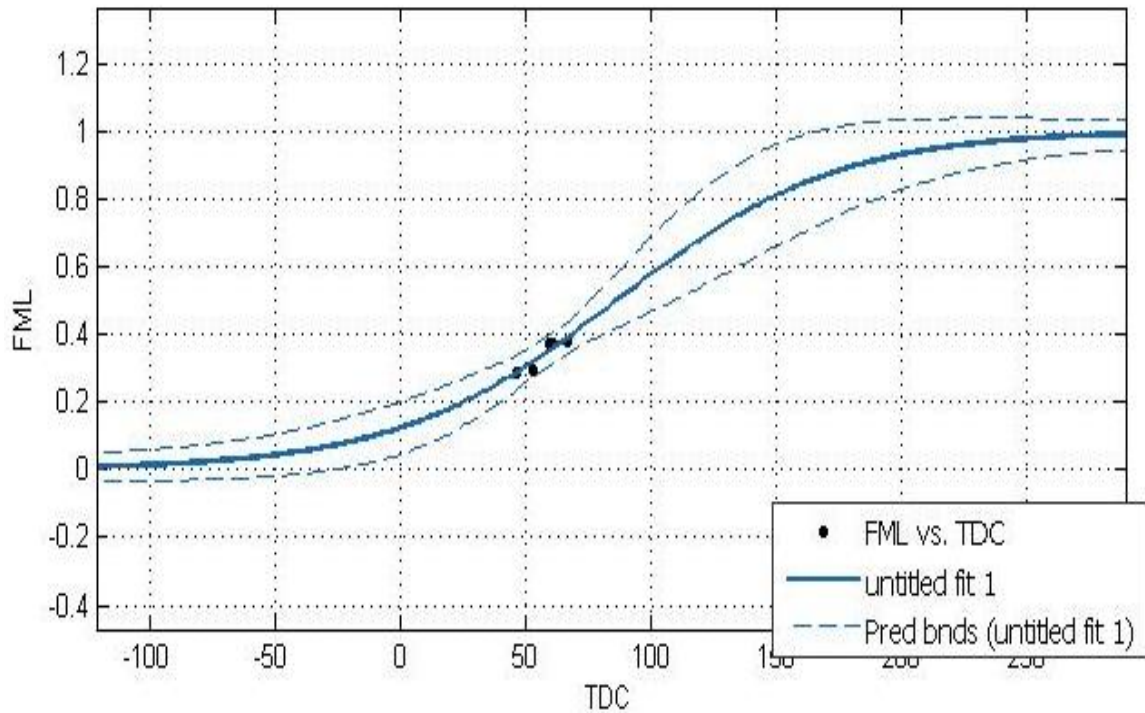


Figura 167. Intervalos de predicción para el modelo empírico del FML.

1.2. Modelos estadísticos para la sinuosidad.

Los modelos estadísticos planteados para la Sinuosidad, se determinan a través del comportamiento de las variables independientes. A continuación, se esgrimen los modelos estadísticos preseleccionados que mejor simulan el comportamiento de la Sinuosidad en las condiciones planteadas.

1.2.1. Modelo estadístico tipo potencial.

La hipótesis del modelo estadístico planteado, indica que la Sinuosidad (S_m) depende de la variable tasa de descenso de caudal (TDC), bajo un comportamiento potencial. Por lo tanto, el modelo estadístico preseleccionado presenta la siguiente función a estimar:

$$S_m = A * TDC^B \quad (7)$$

1.2.1.1. Estimación de parámetros aplicando Montecarlo.

Los valores semillas para las variables desconocidas, son $A=4.31$ y $B=-0.44$, los cuales se encuentra dentro del intervalo establecido para cada variable, tal como se indica en la Tabla 13.

Tabla 71. Estimación de estadísticos para valores semilla.

	min	max		semilla
A	0	10		5,564
B	-0,5	0		-0,019
C	0	0		0

corridas	1000
----------	------

Smobsmed	1,93795				SSE	SSR			
TDC	Sm	Sm calc	(Smobs-Smcalc)^2	(Smcal-Smprom)^2	ERROR 1	ERROR 2	SST	R2	1-R2
66,55	1,900	5,127	10,412	10,168	61,538	61,503	123,041	0,500	0,500
53,14	2,000	5,149	9,918	10,312					
46,33	2,110	5,163	9,321	10,401					
67,13	1,865	5,126	10,631	10,163					
61,00	1,876	5,135	10,624	10,224					
60,00	1,876	5,137	10,632	10,234					

Se realizaron 1000 corridas para la estimación de los parámetros, aplicando el método de Montecarlo, tal como se indica en la Tabla 14.

Tabla 72. Parámetros seleccionados del modelo estadístico tipo potencial

R2	1-R2	A	B
0,895	0,106	7,341	-0,330

En la Figura 16, podemos observar el comportamiento del parámetro A determinado por simulación de Montecarlo, la dispersión de los datos presenta una tendencia constante sobre un r^2 de 0.5, con valores localizados entre los r^2 de 0.6 y 0.9.

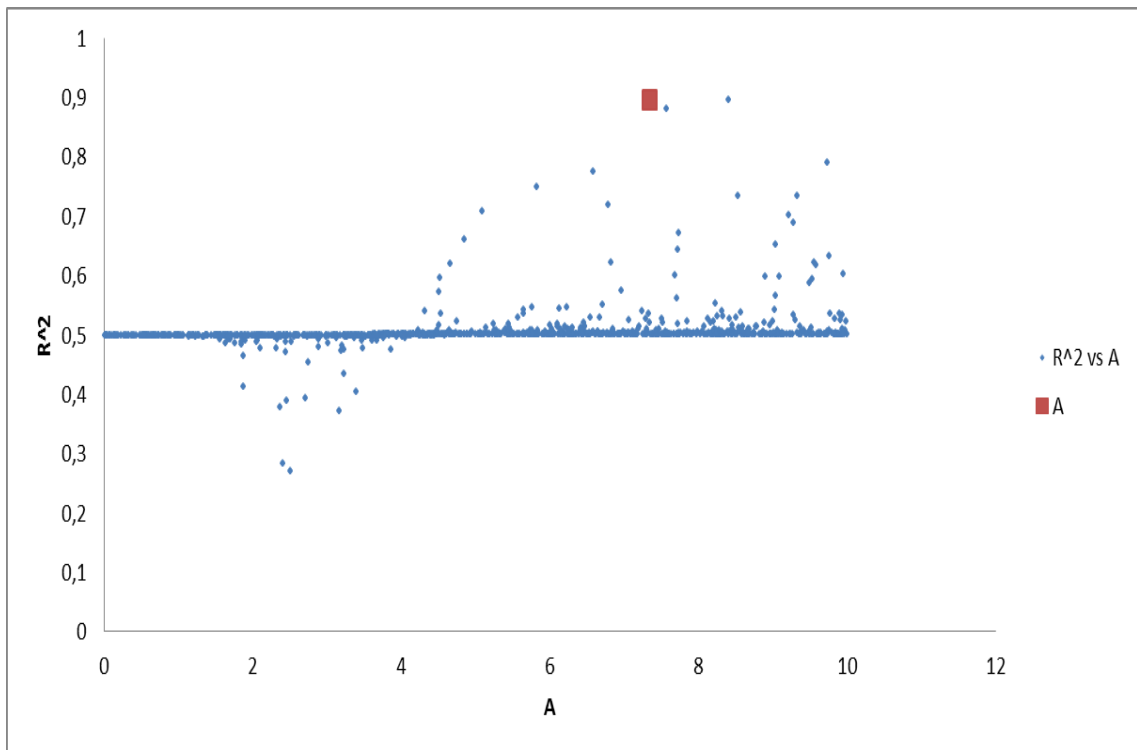


Figura 168. Comportamiento del parámetro A en Montecarlo.

En la Figura 17, podemos observar el comportamiento del parámetro B determinado por simulación de Montecarlo, la dispersión de los datos presenta una tendencia constante sobre un r^2 de 0.5, con valores localizados entre los r^2 de 0.6 y 0.9.

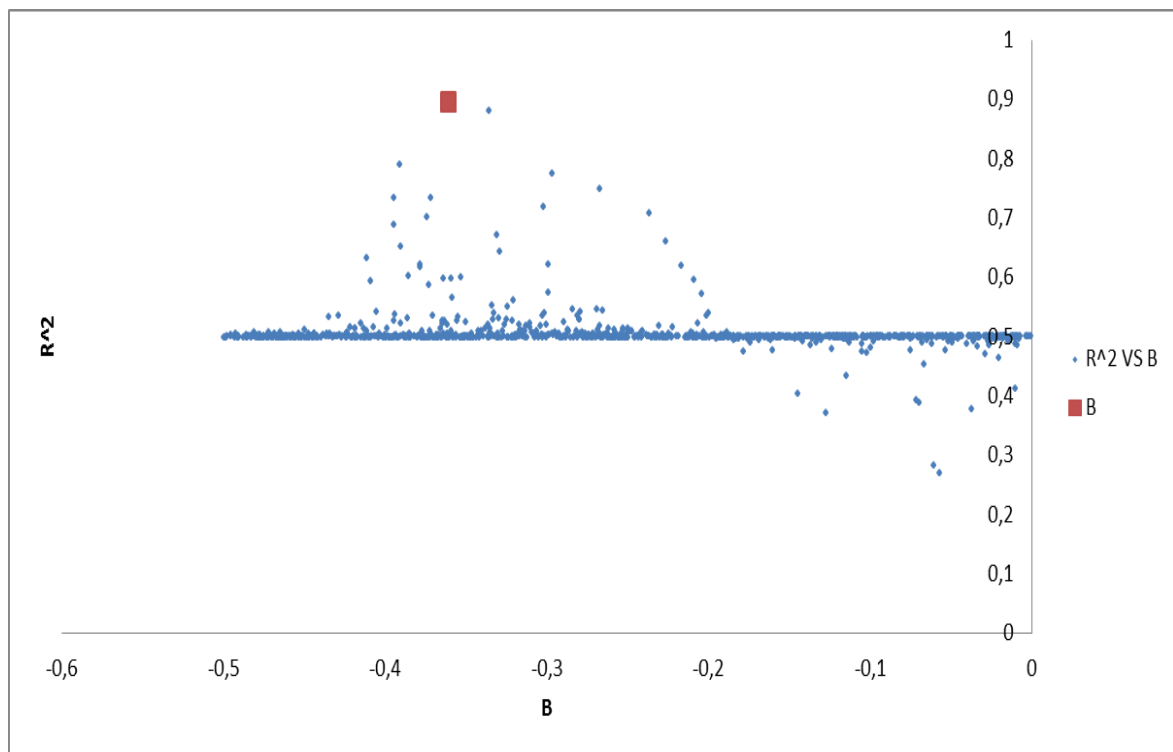


Figura 169. Comportamiento del parámetro B en Montecarlo.

1.2.1.2. Análisis de varianza

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión no lineal para describir la relación entre sinuosidad (Sm) y una variable independiente. La ecuación del modelo ajustado es:

$$Sm = 7.4 * TDC^{-0.33} \quad (8)$$

Se determinan los estadísticos para el modelo tipo potencial de la Sinuosidad (Sm), tal como se observa en la Tabla 15.

Tabla 73. ANOVA del modelo tipo potencial del Sm

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>
Modelo	22,5755	2	11,2878
Residuo	0,00618101	4	0,00154525
Total	22,5817	6	
Total	0,0477937	5	
R-Cuadrada = 87,0673 por ciento			
R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 83,8341 por ciento			
Error estándar del est. = 0,0393097			
Error medio absoluto = 0,0275939			
Estadístico Durbin-Watson = 0,869451			
Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,206685			

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajusta el 87% de la variabilidad en Sm. Por su parte, el estadístico R-Cuadrada ajustada es de 83,8%. En el análisis de los errores, el error estándar muestra que la desviación de los residuos es 0,039 y el error absoluto medio (MAE) considerado el valor promedio de los residuos es de 0,027.

1.2.1.3. Análisis de residuos

Los residuos no presentan tendencias, ni curvas en la gráfica y la dispersión vertical de los datos no varía mucho con la horizontal, tal como se observa en la Figura 18.

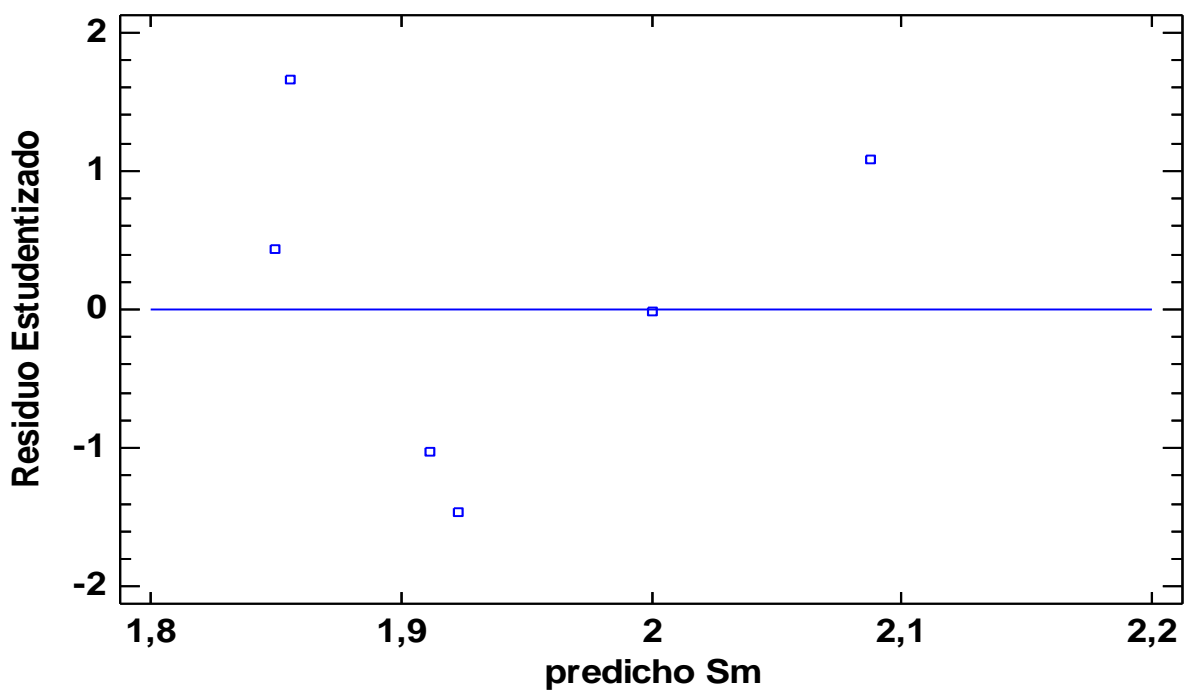


Figura 170. Análisis de residuos para el modelo potencial de la Sinuosidad.

1.2.1.4. Tasas de variación

Las tasas de variación establecidas para la Sinuosidad, permiten inferir a través del diagrama de Theil si los datos obtenidos se encuentran sobre estimados o subestimados. La tabla 16, indican las tasa de variación de los resultados teóricos y los estimados.

Tabla 74. Tasa de variación para la Sinuosidad.

TDC	Sm- TEORICO	Sm- ESTADISTICO	TASAS DE VARIACION	
			%M TEORICO	% M ESTIMADO
66,55	1,9000	1,852		
53,14	2,0000	1,995	5,00	7,16
46,33	2,1100	2,087	5,21	4,42
67,125	1,8654	1,847	-13,11	-13,02
61	1,8759	1,906	0,56	3,11
60	1,8764	1,916	0,03	0,54
			U de Theil	0,113

El indicador U de Theil registra un valor de 0.113, lo que indica un 11% en la bondad de ajuste sobre la predicción. En la Figura 19, se observa el diagrama de Theil para el modelo potencial de la Sinuosidad (Sm).

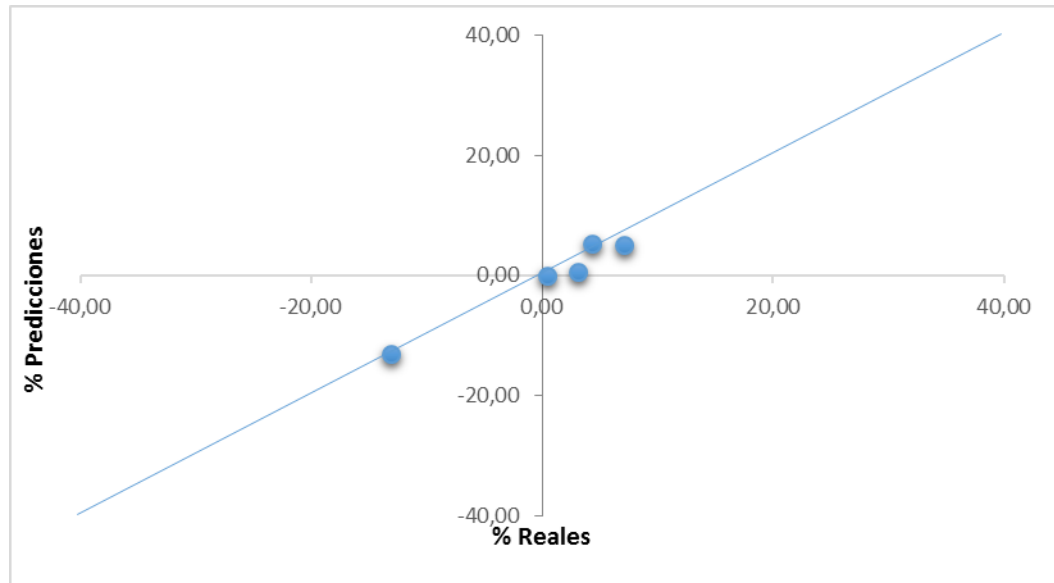


Figura 171. Diagrama de predicción- realización de Theil para el modelo potencial de la Sm.

1.2.1.5. Intervalos de predicción.

Los intervalos de predicción con un 90% de confianza, se establecen para el modelo estadístico tipo potencial de la sinuosidad (Sm), tal como se indica en la Figura 20.

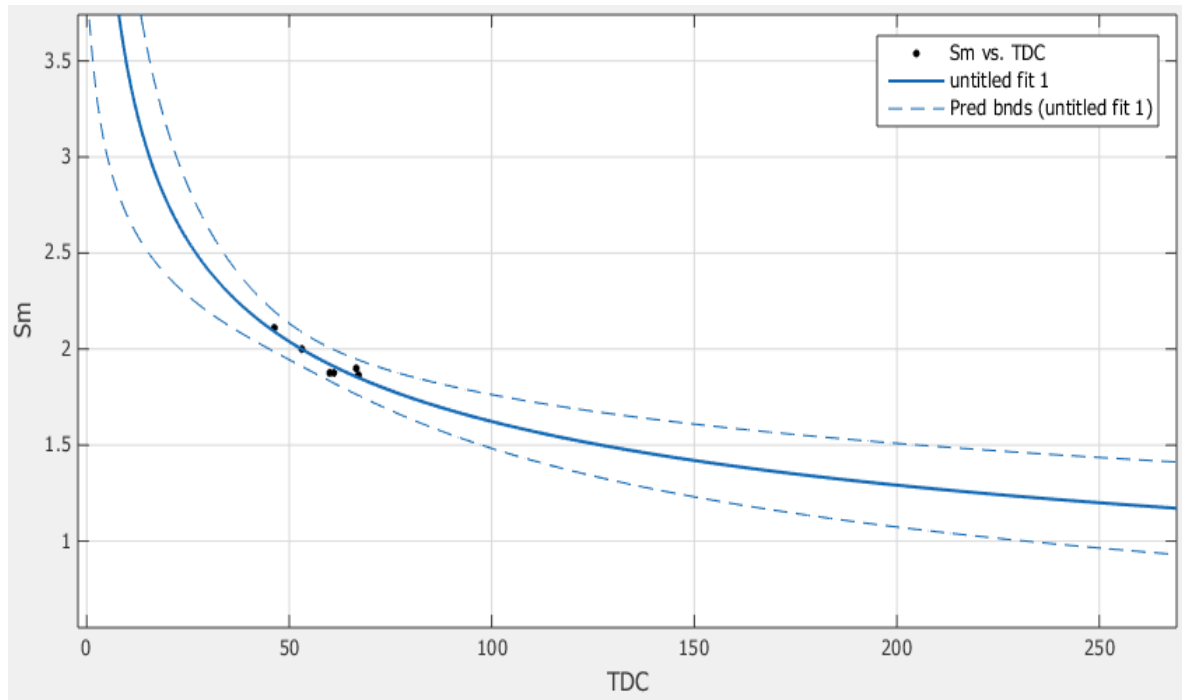


Figura 20. Intervalos de predicción para el modelo tipo potencial de Sm.

1.2.2. Modelo estadístico tipo exponencial.

La hipótesis del modelo estadístico planteado, indica que la sinuosidad (Sm) depende de la variable tasa de descenso de caudal (TDC), bajo un comportamiento exponencial. Por lo tanto, el modelo estadístico preseleccionado presenta la siguiente función a estimar:

$$Sm = \exp \left(A + \frac{B}{TDC} \right) \quad (9)$$

A continuación, los resultados en la estimación de los parámetros, aplicando el método de Montecarlo.

1.2.2.1. Estimación de parámetros aplicando Montecarlo.

Los valores semillas para las variables desconocidas, son A=0.3909 y B=22.6908, los cuales se encuentra dentro del intervalo establecido para cada variable, tal como se indica en la Tabla 17.

Tabla 75. Estimación de estadísticos para valores semilla.

	min	max	semilla	corridas	1000
A	0	1	0,483		
B	0	60	53,087		
C	0	0	0		

Smobsmed	1,93795				SSE	SSR			
TDC	Sm	Sm calc	(Smobs-Smcalc)^2	(Smcal-Smprom)^2	ERROR 1	ERROR 2	SST	R2	1-R2
66,55	1,9	3,602	2,895	2,768	28,758	29,256	58,014	0,504	0,496
53,14	2	4,405	5,783	6,085					
46,33	2,11	5,101	8,949	10,008					
67,13	1,8654	3,577	2,930	2,687					
61,00	1,8759	3,873	3,987	3,743					
60,00	1,8764	3,929	4,214	3,965					

Se realizaron 1000 corridas para la estimación de los parámetros, aplicando el método de Montecarlo, tal como se indica en la Tabla 18.

Tabla 76. Parámetros seleccionados del modelo estadístico tipo exponencial.

R2	1-R2	A	B
0,891	0,106	0,345	18,781

En la Figura 20, se indica el comportamiento del parámetro A determinado por simulación de Montecarlo, la dispersión de los datos no presenta una tendencia definida.

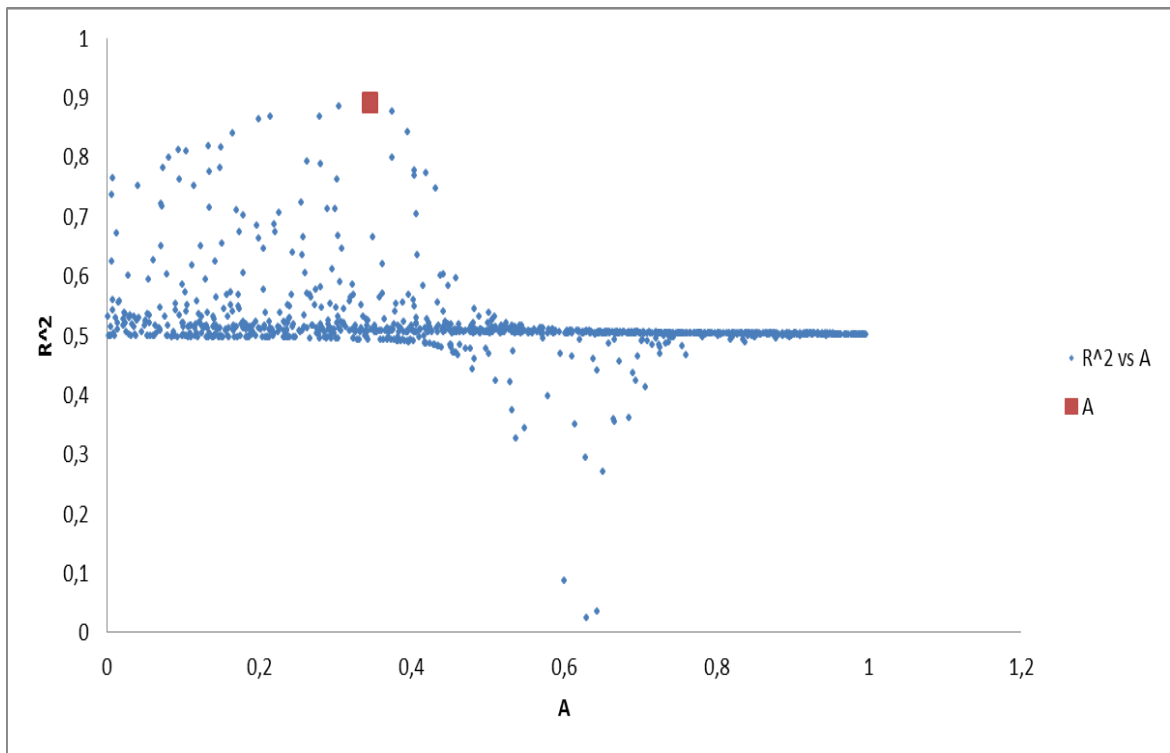


Figura 172. Comportamiento del parámetro A en Montecarlo.

En la Figura 21, se observar el comportamiento del parámetro B determinado por simulación de Montecarlo, la dispersión de los datos no presenta una tendencia definida.

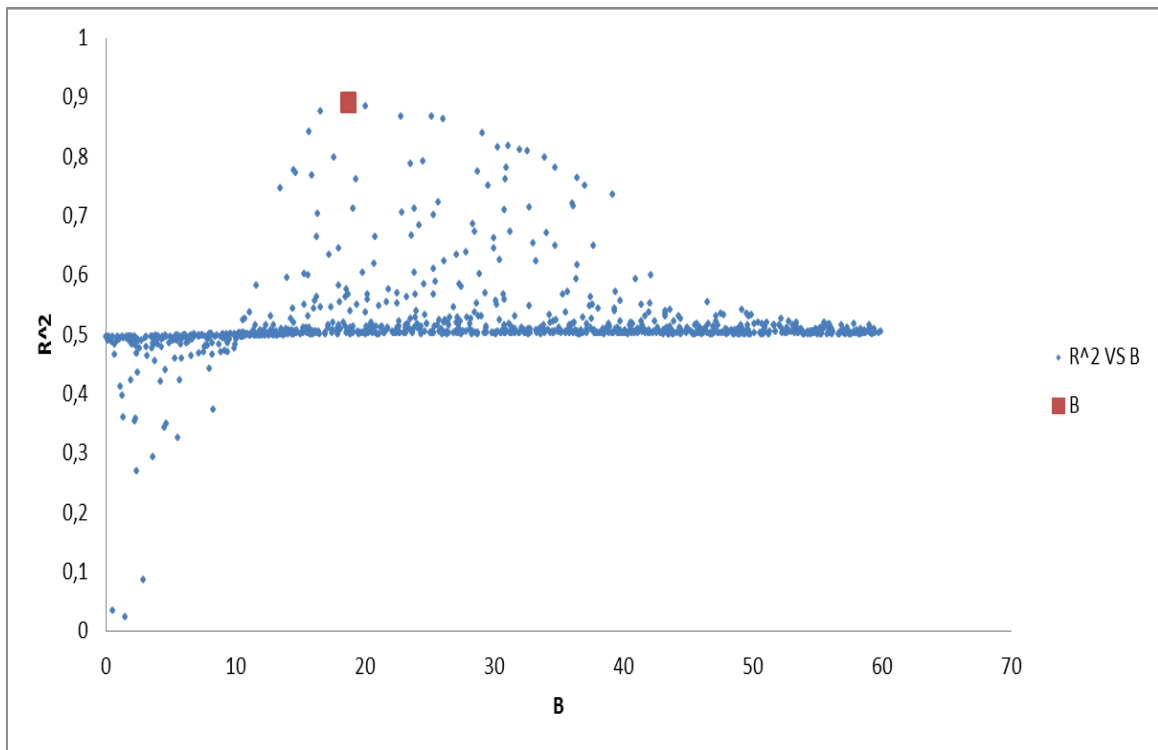


Figura 173. Comportamiento del parámetro B en Montecarlo.

1.2.2.2. Análisis de varianza

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión no lineal para describir la relación entre S_m y 1 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es:

$$S_m = \exp\left(0.342 + \frac{18.49}{TDC}\right) \quad (10)$$

Se determinan los estadísticos para el modelo tipo exponencial de la Sinuosidad (S_m), tal como se observa en la Tabla 19.

Tabla 77. ANOVA del modelo tipo exponencial de la Sm

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>
Modelo	22,5772	2	11,2886
Residuo	0,00449209	4	0,00112302
Total	22,5817	6	
Total	0,0477937	5	
R-Cuadrada = 90,6011 por ciento			
R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 88,2514 por ciento			
Error estándar del est. = 0,0335115			
Error medio absoluto = 0,023357			
Estadístico Durbin-Watson = 0,681825			
Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,295145			

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajusta el 90,6% de la variabilidad en Sm. Por su parte, el estadístico R-Cuadrada ajustada es de 88,2%. En el análisis de los errores, el error estándar muestra que la desviación de los residuos es 0,033 y el error absoluto medio (MAE) considerado el valor promedio de los residuos es de 0,023.

1.2.2.3. Análisis de residuos

Los residuos no presentan tendencias, ni curvas en la gráfica y la dispersión vertical de los datos no varía mucho con la horizontal, tal como se observa en la Figura 22.

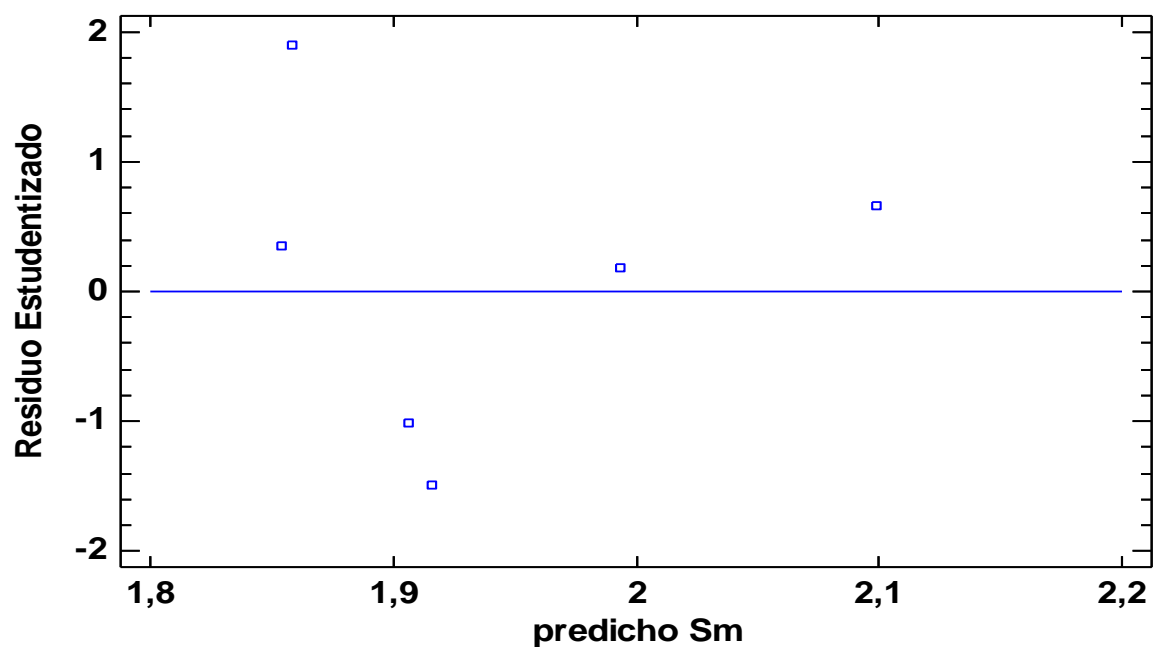


Figura 174. Análisis de residuos para el modelo exponencial de la Sinuosidad.

1.2.2.4. Tasas de variación

La Tabla 20, indican las tasa de variación de los resultados teóricos y los estimados, a través del modelo estadístico tipo exponencial para la Sinuosidad (Sm).

Tabla 78. Tasa de variación para la Sinuosidad.

TDC	Sm- TEORICO	Sm- ESTADISTICO	TASAS DE VARIACION	
			%M TEORICO	% M ESTIMADO
66,55	1,9000	1,859		
53,14	2,0000	1,994	5,00	6,77
46,33	2,1100	2,098	5,21	4,99
67,125	1,8654	1,854	-13,11	-13,16
61	1,8759	1,906	0,56	2,73
60	1,8764	1,916	0,03	0,50
			U de Theil	0,092

El indicador U de Theil registra un valor de 0.092, lo que indica un 9.2% en la bondad de ajuste sobre la predicción. En la Figura 23, se observa el diagrama de Theil para el modelo exponencial de la Sinuosidad.

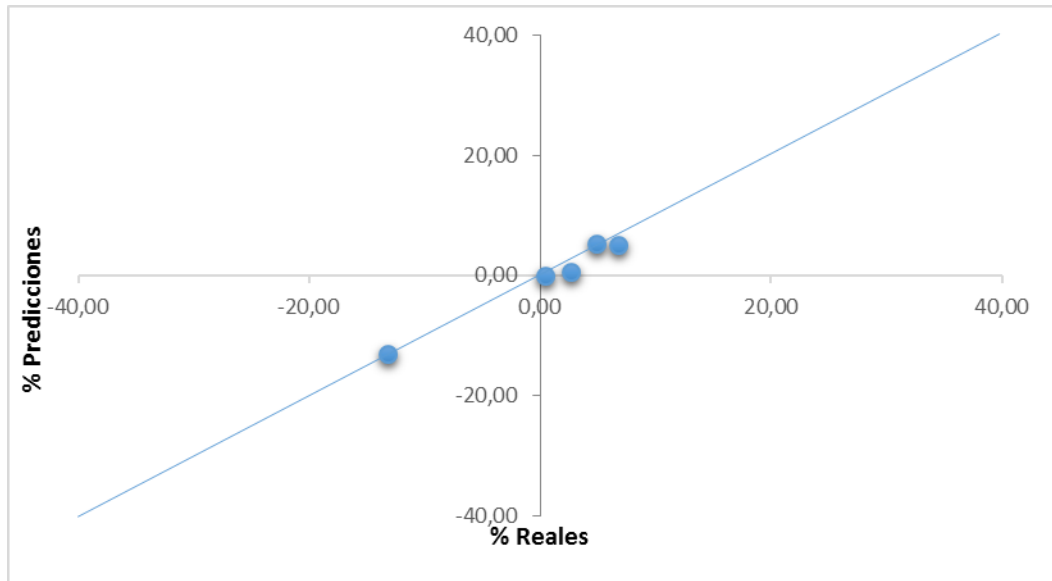


Figura 175. Diagrama de predicción- realización de Theil para el modelo exponencial de la Sm.

1.2.2.5. Intervalos de predicción.

Los intervalos de predicción con un 90% de confianza, se establecen para el modelo estadístico tipo exponencial de la sinuosidad (Sm), tal como se indica en la Figura 24.

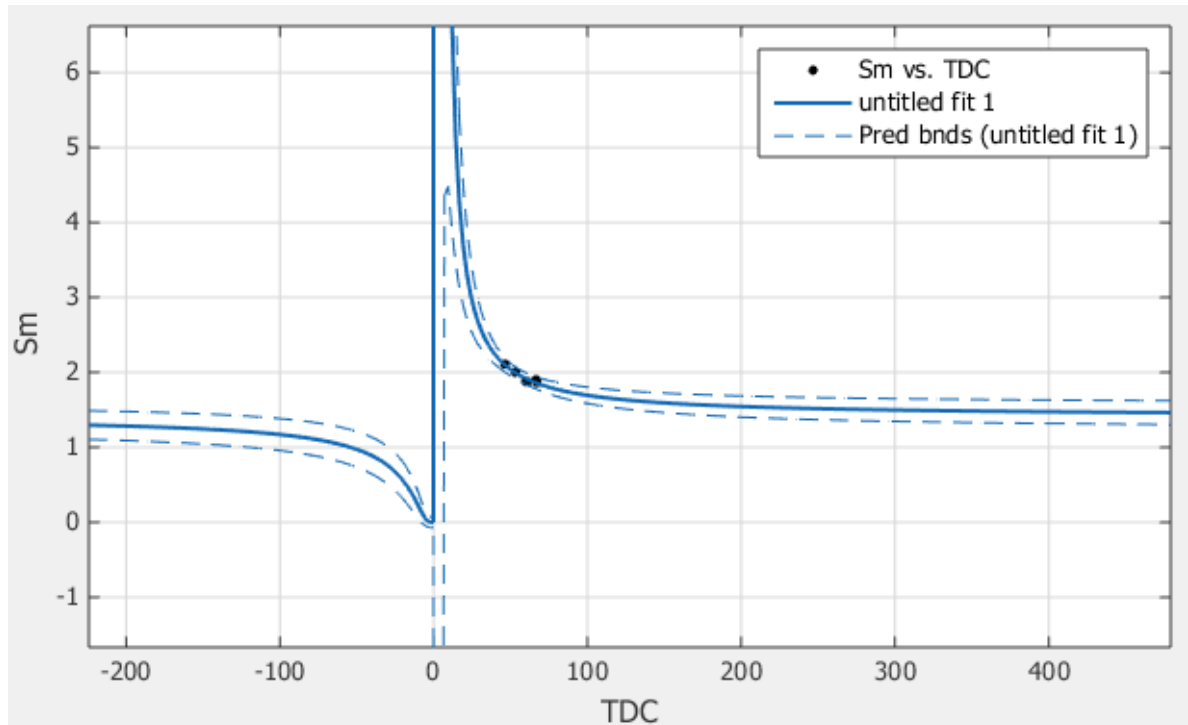


Figura 176. Intervalos de predicción para el modelo tipo exponencial de la Sm.

1.2.3. Modelo estadístico tipo exponencial tipo 2.

Teniendo en cuenta la premisa de la hipótesis, que indica una dependencia de la Sinuosidad (S_m) hacia la variable tasa de descenso de caudal (TDC), se plantea un modelo empírico cuyo ensayo registra una variación en la condición de operación de la variable independiente y en los valores de la variable proceso afectada. Por lo tanto, el modelo estadístico preseleccionado presenta la siguiente función a estimar:

$$S_m = \left(\frac{1}{A+B \cdot TDC^C} \right) \quad (11)$$

A continuación, los resultados en la estimación de los parámetros, aplicando el método de Montecarlo.

1.2.3.1. Estimación de parámetros aplicando Montecarlo.

Los valores semillas para las variables desconocidas, son A=-0.166, B=0.042 y C=0.482, los cuales se encuentra dentro del intervalo establecido para cada variable, tal como se indica en la Tabla 21.

Tabla 79. Estimación de estadísticos para valores semilla.

	min	max	Semilla	corridas	1000
A	0	0,5	0,048		
B	0	0,08	0,017		
C	0,4	0,8	0,655		

Smobsmed	1,938				SSE	SSR			
TDC	Sm	Sm calc	(Smobs-Smcalc)^2	(Smcal-Smprom)^2	ERROR 1	ERROR 2	SST	R2	1-R2
66,55	1,9	3,109	1,461	1,371	12,026	12,223	24,249	0,504	0,496
53,14	2	3,519	2,307	2,499					
46,33	2,11	3,789	2,819	3,427					
67,13	1,8654	3,094	1,510	1,337					
61,00	1,8759	3,263	1,923	1,755					
60,00	1,8764	3,293	2,005	1,835					

Se realizaron 1000 corridas para la estimación de los parámetros, aplicando el método de Montecarlo, tal como se indica en la Tabla 22.

Tabla 80. Parámetros seleccionados del modelo empírico.

R2	1-R2	A	B	C
0,8724	0,10571544	0,172	0,044	0,533

En la Figura 25, se indica el comportamiento del parámetro A, determinado por simulación de Montecarlo, la dispersión de los datos presenta una tendencia definida.

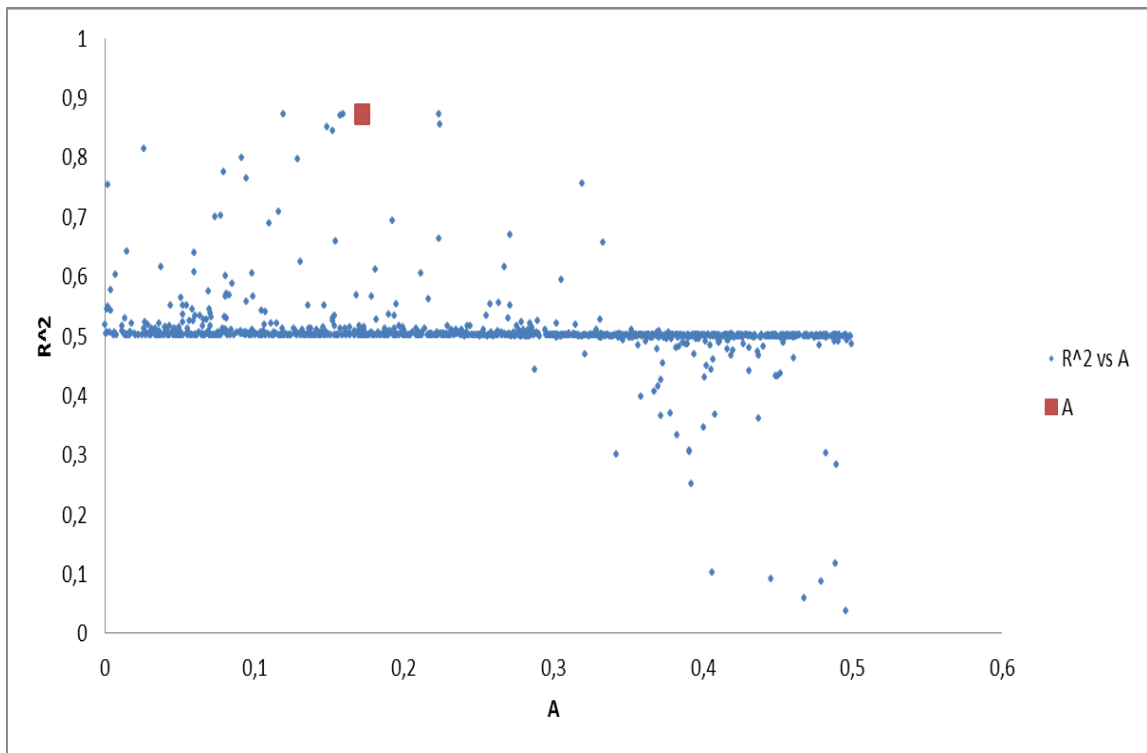


Figura 177. Comportamiento del parámetro A en Montecarlo.

En la Figura 26, se observa el comportamiento del parámetro B, determinado por simulación de Montecarlo, la dispersión de los datos con tendencia ascendente.

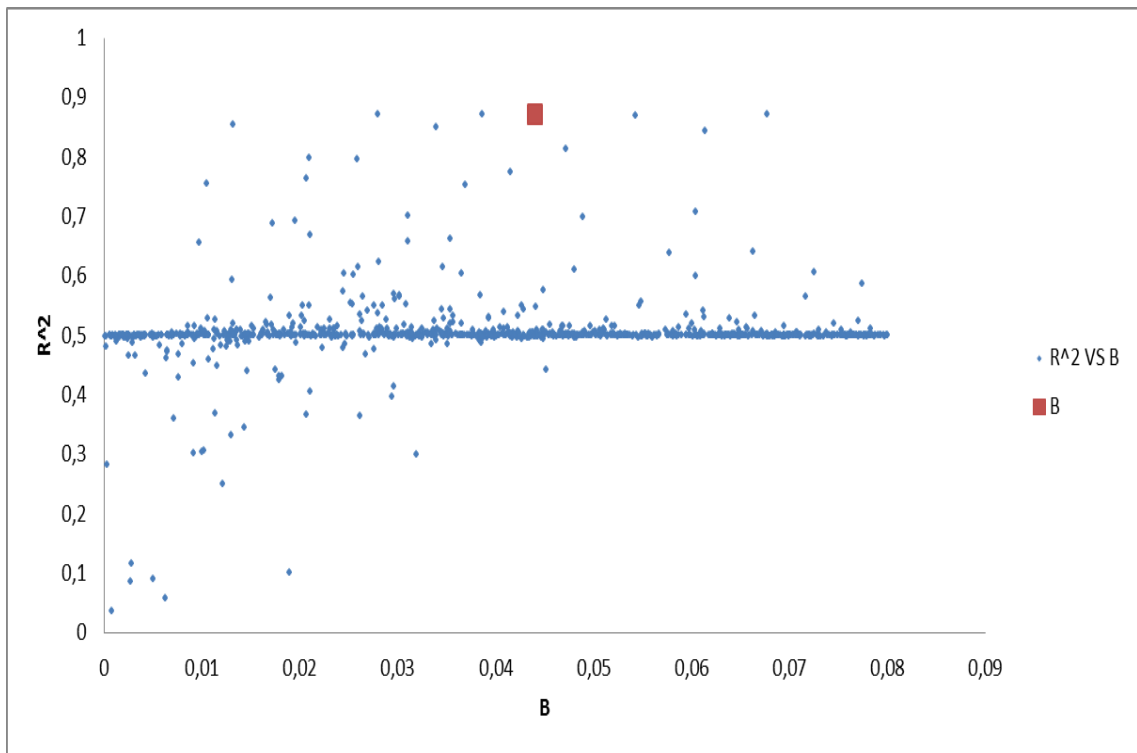


Figura 178. Comportamiento del parámetro B en Montecarlo.

En la Figura 27, se observa el comportamiento del parámetro C, determinado por simulación de Montecarlo, la dispersión de los datos con tendencia ascendente.

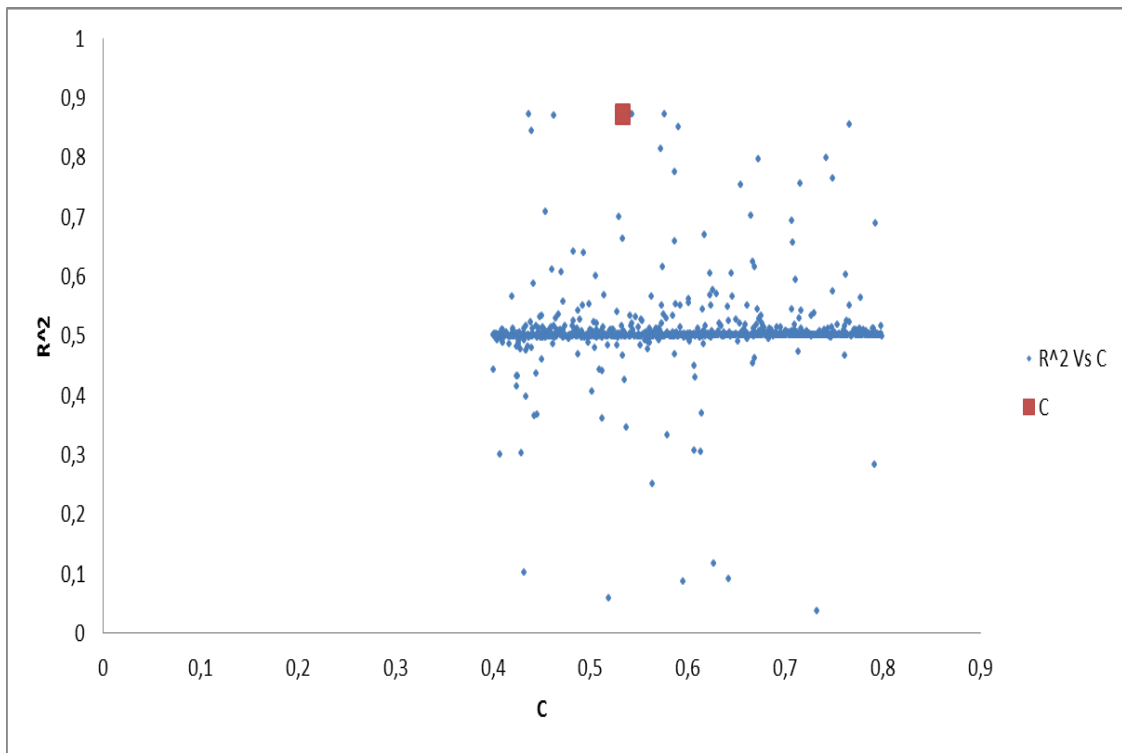


Figura 179. Comportamiento del parámetro C en Montecarlo.

1.2.3.2. Análisis de varianza

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión no lineal para describir la relación entre Sm y 1 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es:

$$Sm = \left(\frac{1}{0.1724 + 0.04494 * TDC^{0.5}} \right) \quad (12)$$

Se determinan los estadísticos para el modelo empírico de la Sinuosidad (Sm), tal como se observa en la Tabla 23.

Tabla 81. ANOVA del modelo empírico del Sm

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>
Modelo	22,5752	3	7,52508
Residuo	0,00645439	3	0,00215146
Total	22,5817	6	
Total	0,0477937	5	
R-Cuadrada = 86,4953 por ciento			
R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 77,4922 por ciento			
Error estándar del est. = 0,0463839			
Error medio absoluto = 0,0284099			
Estadístico Durbin-Watson = 0,887132			
Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,229179			

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajusta el 86,4% de la variabilidad en Sm. Por su parte, el estadístico R-Cuadrada ajustada es de 77,4%. En el análisis de los errores, el error estándar muestra que la desviación de los residuos es 0,046 y el error absoluto medio (MAE) considerado el valor promedio de los residuos es de 0,028.

1.2.3.3. Análisis de residuos

En la dispersión de los residuos, se identifica la presencia de un punto con residuo inusualmente grande. Sin embargo, el dato atípico identificado no se elimina, al considerarse un punto influyente en una dispersión de pocos datos, tal como la observada en la Figura 28.

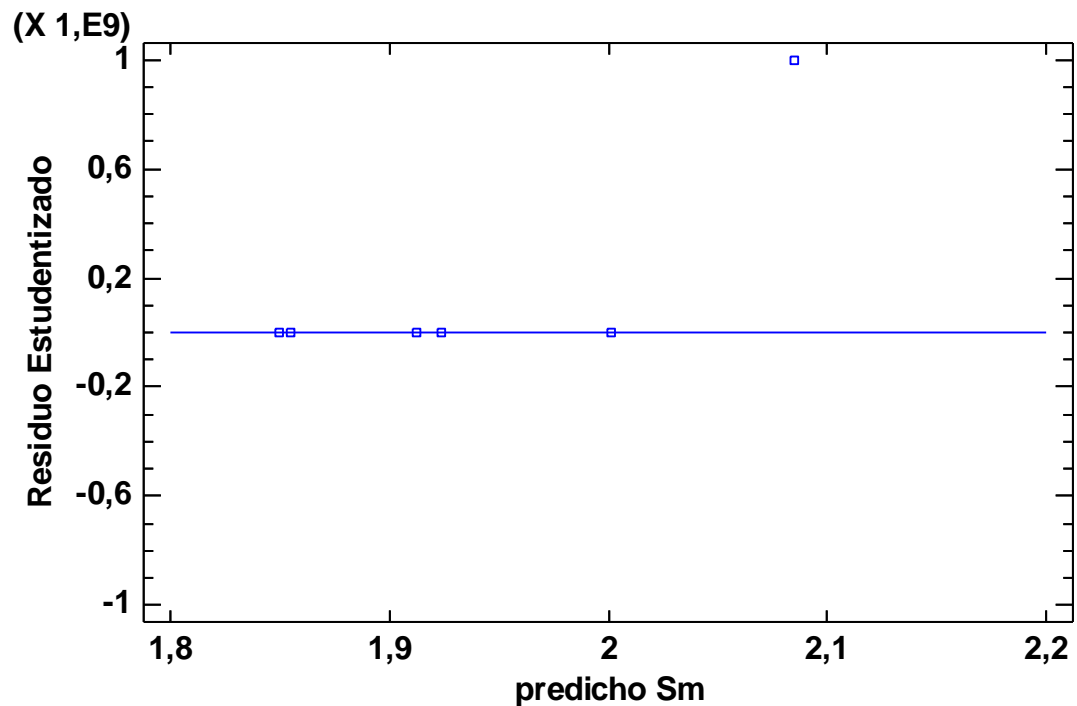


Figura 180. Análisis de residuos para el modelo empírico de la Sinuosidad

1.2.3.4. Tasas de variación

La Tabla 24, indican las tasa de variación de los resultados teóricos y los estimados a través del modelo empírico para la Sinuosidad (Sm).

Tabla 82. Tasa de variación para la sinuosidad.

TDC	Sm- TEORICO	Sm- ESTADISTICO	TASAS DE VARIACION	
			%M TEORICO	% M ESTIMADO
66,55	1,9000	1,855		
53,14	2,0000	2,000	5,00	7,24
46,33	2,1100	2,091	5,21	4,34
67,125	1,8654	1,850	-13,11	-13,03
61	1,8759	1,911	0,56	3,18
60	1,8764	1,921	0,03	0,55
			U de Theil	0,117

El indicador U de Theil registra un valor de 0.117, lo que indica un 11.7% en la bondad de ajuste sobre la predicción. En la Figura 29, se observa el diagrama de Theil para el modelo empírico del factor de migración lateral.

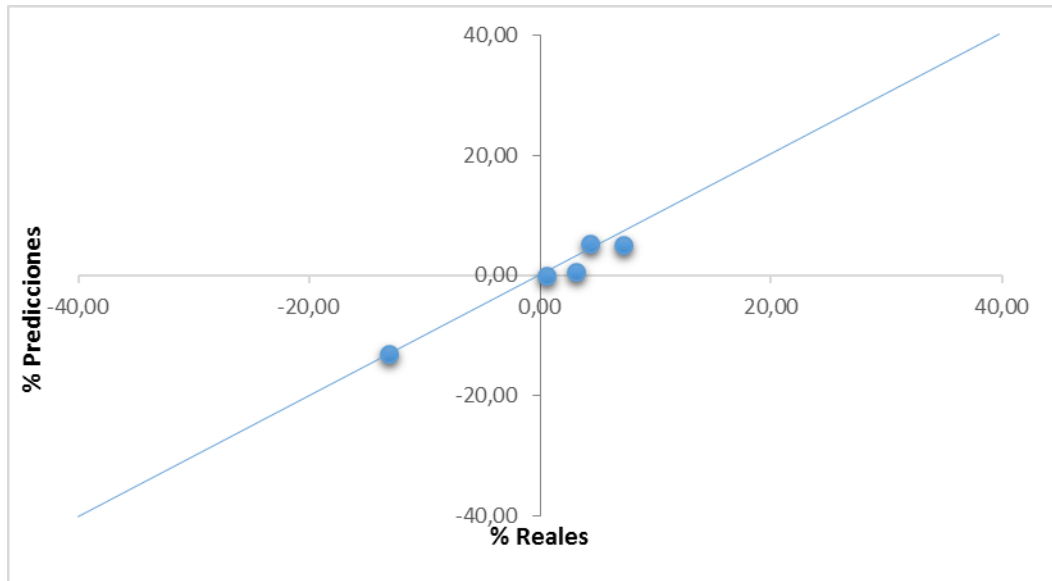


Figura 181. Diagrama de predicción- realización de Theil para el modelo empírico de la Sm.

1.2.3.5. Intervalos de predicción.

Los intervalos de predicción con un 90% de confianza, se establecen para el modelo empírico de la Sinuosidad (Sm), tal como se indica en la Figura 30.

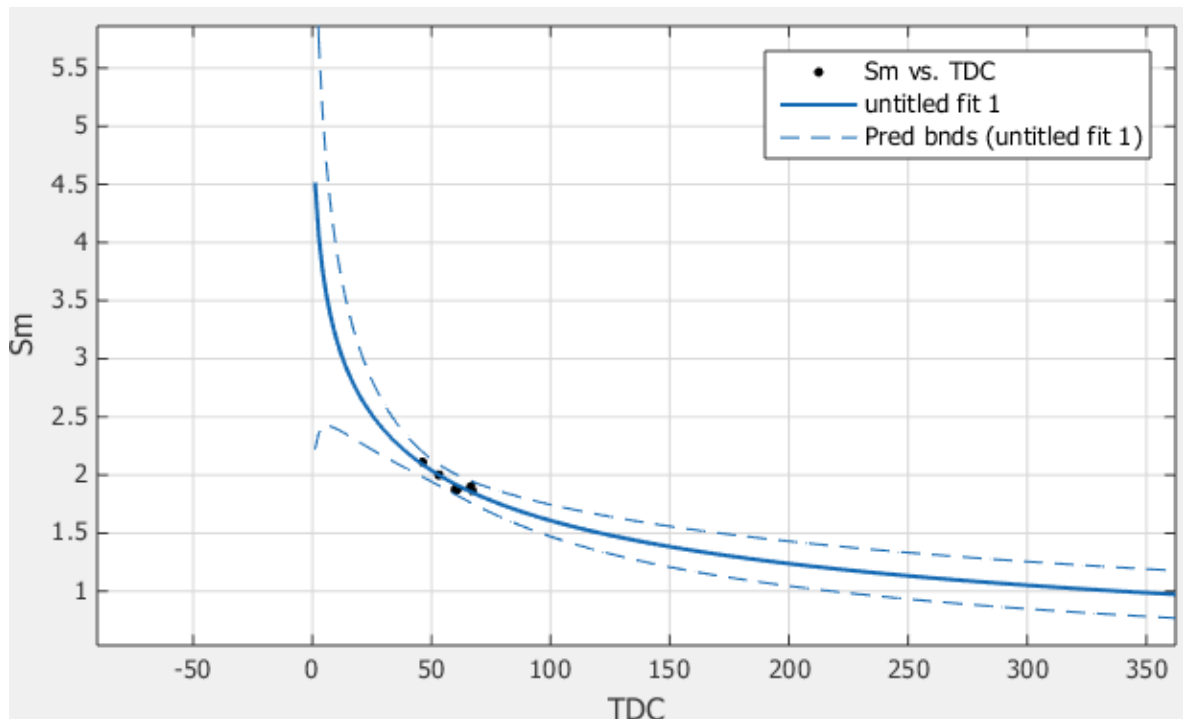


Figura 182. Intervalos de predicción para el modelo empírico del S_m .

1.3. Modelos estadísticos para la diferencia en la distancia relativa.

Los modelos estadísticos planteados para la diferencia en la distancia relativa, se determinan a través del comportamiento de variables independientes. A continuación, se analizan los modelos que mejor simulan el comportamiento de la diferencia en la distancia relativa para las condiciones planteadas.

1.3.1. Modelo estadístico con comportamiento gaussiano.

La hipótesis del modelo estadístico planteado, indica que la diferencia en la distancia relativa (DDR) depende de las variables tasa de descenso de caudal (TDC) y la duración del caudal alto (DCA). Por lo tanto, el modelo estadístico pre-seleccionado presenta la siguiente función a estimar:

$$DDR = a * \exp \left(- \left(\left(\frac{\left(\frac{TDC}{DCA} - b \right)^2}{c} \right) \right) \right) \quad (13)$$

A continuación, los resultados en la estimación de los parámetros, aplicando el método de Montecarlo.

1.3.1.1. Estimación de parámetros aplicando Montecarlo.

Los valores semillas para las variables desconocidas, son A=1150, B=18,23 y C=3,7 los cuales se encuentra dentro del intervalo establecido para cada variable, tal como se indica en la Tabla 25.

Tabla 83. Estimación de estadísticos para valores semilla.

	min	max	semilla	corridas	1000
A	0	2000	1096,59		
B	5	25	16,09		
C	0	10	6,37		

DRobsmmed	352				SSE	SSR			
TDC/DCA	DR	DR calc	(DRobs-DRcalc)^2	(DRcal-DRprom)^2	ERROR 1	ERROR 2	SST	R2	1-R2
22,18	496	440,53	3128,71	7824,11	307424,21	901418,59	1208842,80	0,75	0,25
15,58	608,68	1089,65	231326,41	544015,22					
20,87	778,10	625,77	23204,32	74910,16					
31,40	178,52	3,45	30652,76	121541,11					
24,90	25,67	163,04	18870,12	35733,71					
30,00	25	9,45	241,91	117394,27					

Se realizaron 1000 corridas para la estimación de los parámetros, aplicando el método de Montecarlo, tal como se indica en la Tabla 82.

Tabla 84. Parámetros seleccionados del modelo estadístico tipo exponencial.

R2	1-R2	A	B	C
0,924	0,1057	1153	18,6	3,769

En la Figura 31, se indica el comportamiento del parámetro A, determinado por simulación de Montecarlo, la dispersión de los datos no presenta una tendencia definida.

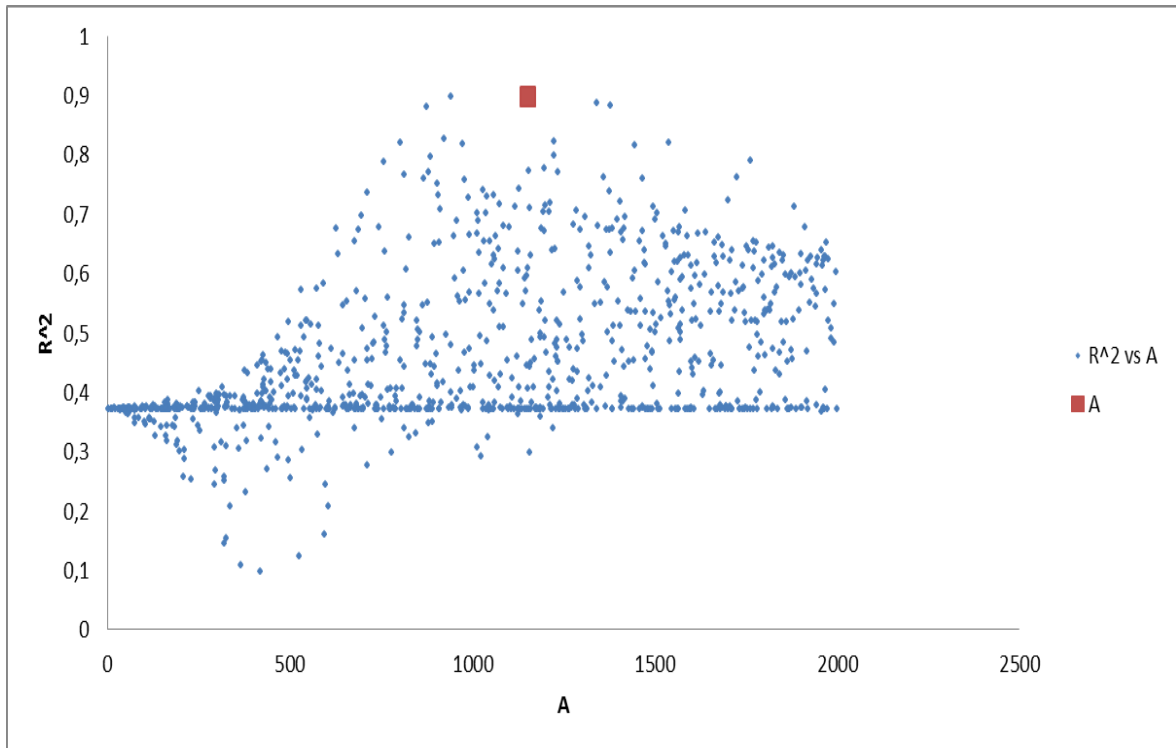


Figura 183. Comportamiento del parámetro A en Montecarlo.

En la Figura 32, se observar el comportamiento del parámetro B, determinado por simulación de Montecarlo, la dispersión de los datos presenta una tendencia ascendente definida.

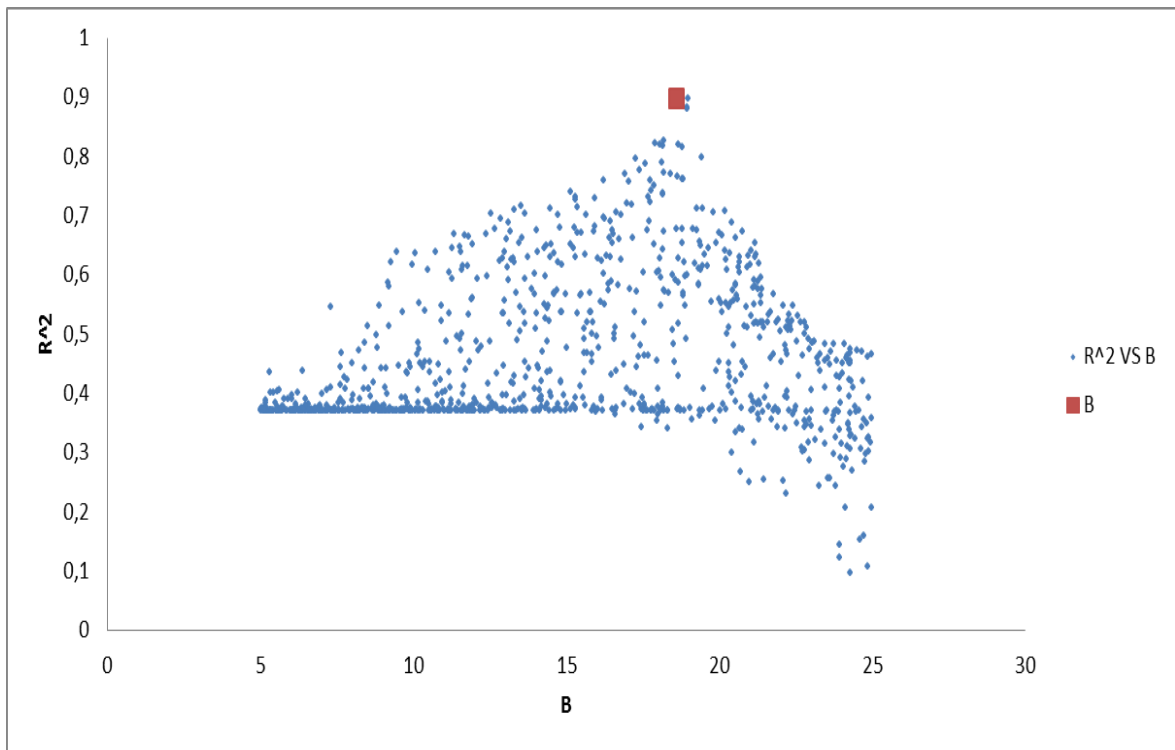


Figura 184. Comportamiento del parámetro B en Montecarlo.

En la Figura 33, se observa el comportamiento del parámetro C, determinado por simulación de Montecarlo, la dispersión de los datos no presenta una tendencia definida.

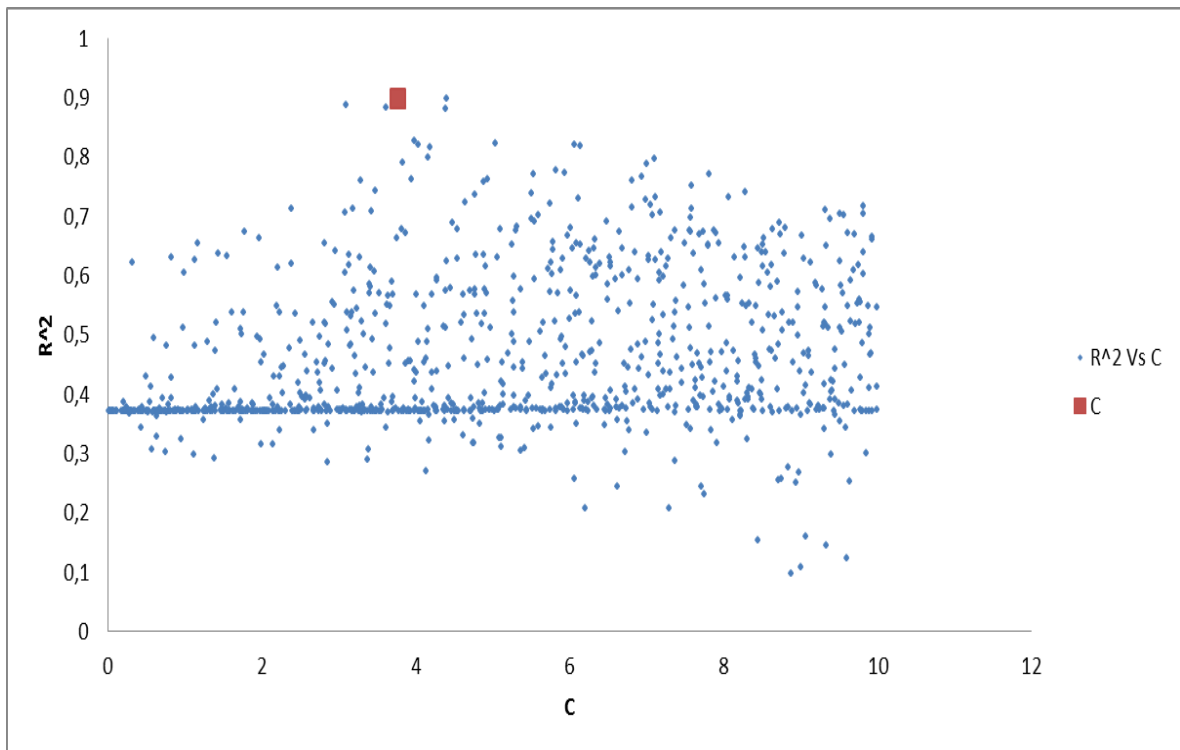


Figura 185. Comportamiento del parámetro C en Montecarlo.

1.3.1.2. Análisis de varianza

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión no lineal para describir la relación entre Diferencia en la distancia relativa (DDR) y dos variables independientes tasa de descenso de caudal (TDC) y la duración de caudales altos (DCA), bajo un comportamiento exponencial.

La ecuación del modelo ajustado es:

$$DDR = 1153 * \exp\left(-\left(\frac{\left(\frac{TDC}{DCA} - 18.6\right)}{3.769}\right)^2\right) \quad (14)$$

Se determinan los estadísticos para el modelo tipo exponencial de la Diferencia en la distancia relativa (DDR), tal como se observa en la Tabla 27.

Tabla 85. ANOVA del modelo tipo exponencial de la DDR

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>
Modelo	1,24E+06	1	1,24E+06
Residuo	35586,8	5	7117,36
Total	1,27E+06	6	
Total (Corr.)	520435	5	
R-Cuadrada = 93,1621 porciento			
R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 93,1621 porciento			
Error estándar del est. = 84,3644			
Error medio absoluto = 48,8737			
Estadístico Durbin-Watson = 2,61294			
Autocorrelación residual de retardo 1 = -0,327473			

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajusta el 93,1% de la variabilidad en DDR. Por su parte, el estadístico R-Cuadrada ajustada es de 93,1%. En el análisis de los errores, el error estándar muestra que la desviación de los residuos es 84,36 y el error absoluto medio (MAE) considerado el valor promedio de los residuos es de 48,87.

1.3.1.3. Análisis de residuos

En la dispersión de los residuos, se identifica la presencia de un punto con residuo inusualmente grande. Sin embargo, el dato atípico identificado no se elimina, al considerarse un punto influyente en una dispersión de pocos datos, tal como se observa en la Figura 34.

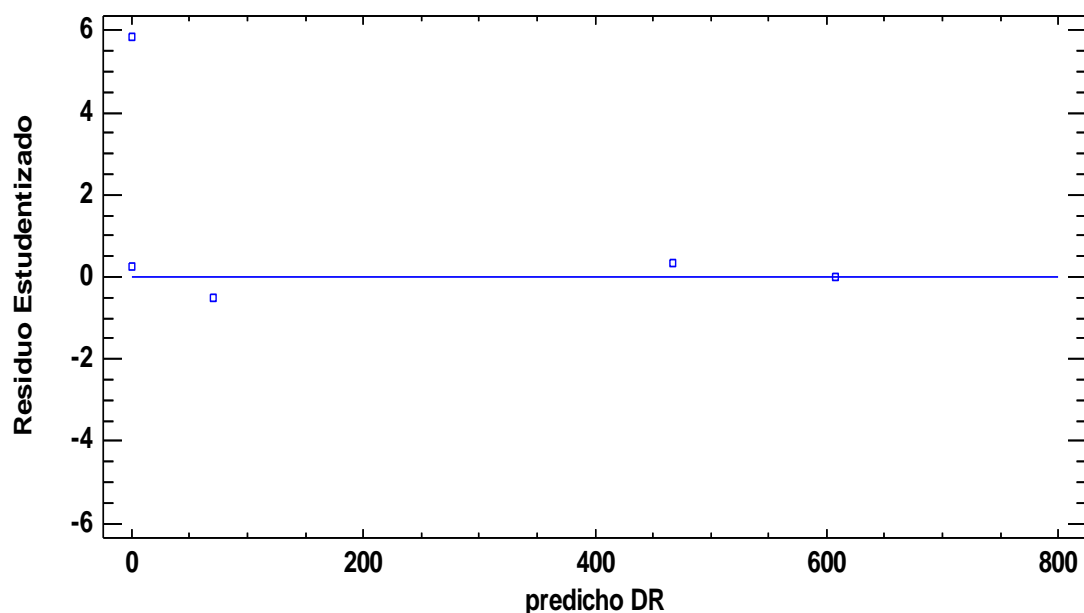


Figura 186. Análisis de residuos para el modelo exponencial de la Diferencia relativa.

1.3.1.4. Tasas de variación

La Tabla 28, indican las tasa de variación de los resultados teóricos y los estimados, a través del modelo estadístico tipo exponencial para la Diferencia en la distancia relativa (DDR)

Tabla 86. Tasa de variación para la Diferencia en la distancia relativa.

TDC/DCA	DDR	DDR calc	TASAS DE VARIACION	
			%M TEORICO	% M ESTIMADO
22,18	496,464	466,95		
15,58	608,685	607,65	-22,60	-30,13
20,87	778,102	802,38	-27,83	-32,05
31,40	178,527	0,01	77,06	100,00
24,90	25,673	70,66	85,62	-100,00
30,00	25	0,12	2,62	99,83
			U de Theil	1,000

El indicador U de Theil registra un valor de 1, lo que indica un 100% en la desigualdad del valor observado sobre la predicción. Por lo cual, los valores estimados por el modelo estadístico ajustan efectivamente en su predicción para los valores teóricos mayores y se diferencian abruptamente para los valores teóricos menores.

En la Figura 35, se observa el diagrama de Theil para el modelo exponencial de la Diferencia en la distancia relativa (DDR).

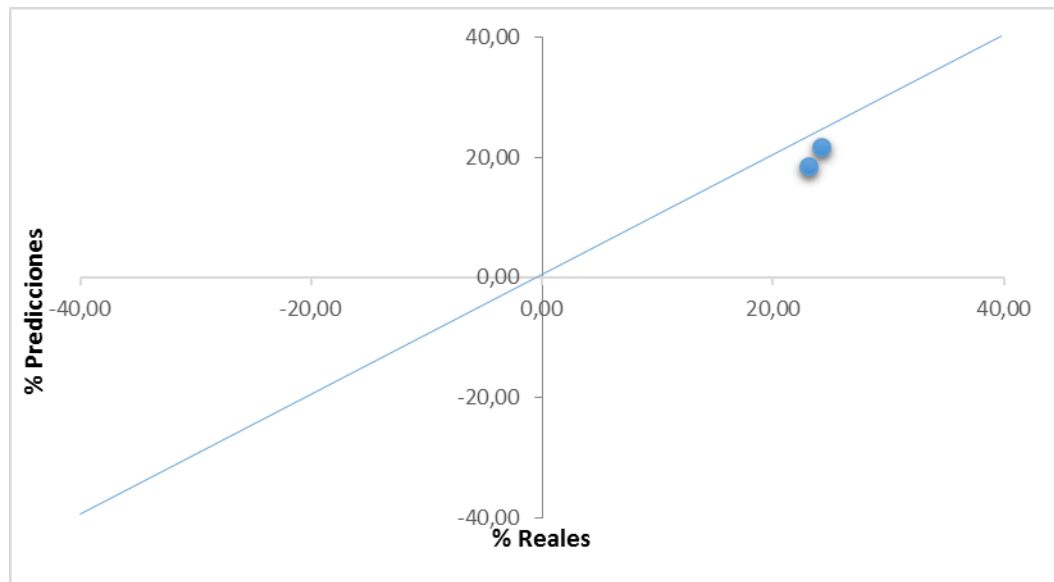


Figura 187. Diagrama de predicción- realización de Theil para el modelo exponencial de la DDR.

1.3.1.5. Intervalos de predicción.

Los intervalos de predicción con un 90% de confianza, se establecen para el modelo estadístico tipo exponencial de la Diferencia en la distancia relativa (DDR), tal como se indica en la Figura 36.

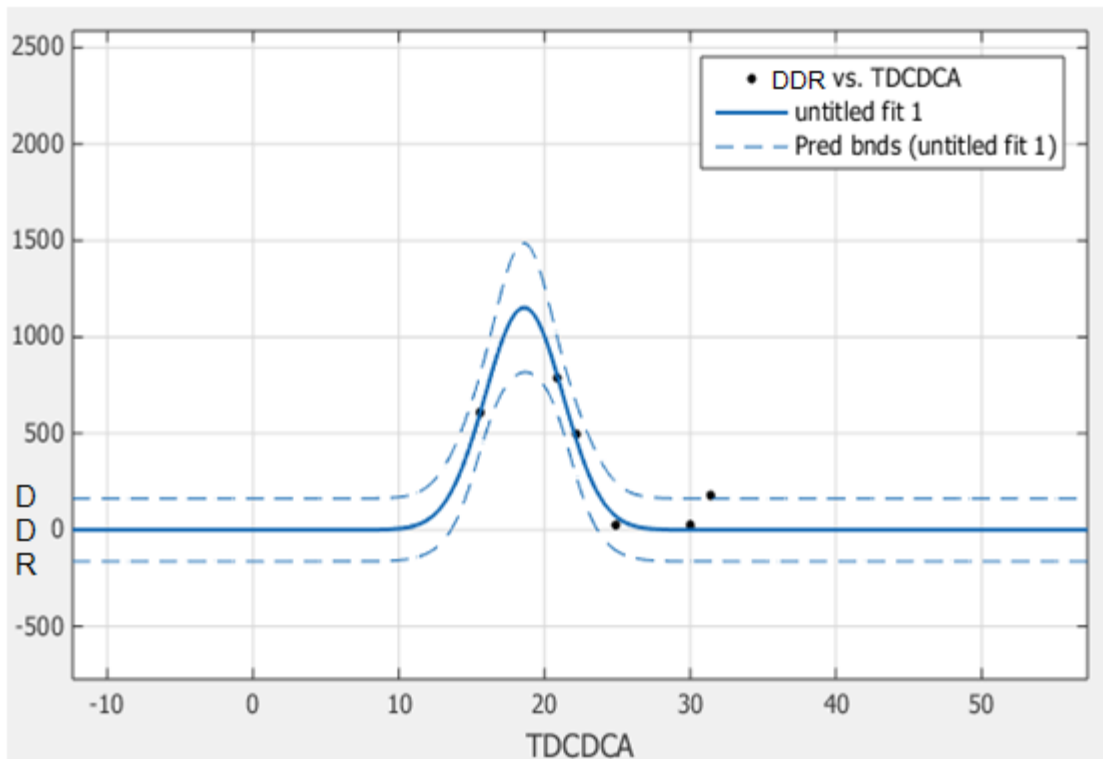


Figura 188. Intervalos de predicción para el modelo tipo exponencial de la DDR.

1.3.2. Modelo estadístico a partir de la función de Fourier.

La hipótesis del modelo estadístico planteado, indica que la Diferencia en la distancia relativa (DDR) presenta un comportamiento armónico con función periódica continua, la cual se expresa a través de la superposición de sinusoides o cosinusoides, generado por el efecto de la variable tasa de descenso de caudal (TDC) sobre el cauce.

Por lo tanto, el modelo empírico planteado presenta la siguiente función a estimar:

$$DDR = a + b * \cos(TDC * d) + c * \sin(TDC * d) \quad (15)$$

A continuación, los resultados en la estimación de los parámetros, aplicando el método de Montecarlo.

1.3.2.1. Estimación de parámetros aplicando Montecarlo.

Los valores semillas para las variables desconocidas, son A=430.60, B=264.20, C=-306.67 y D=241.95, los cuales se encuentra dentro del intervalo establecido para cada variable, tal como se indica en la Tabla 29.

Tabla 87. Estimación de estadísticos para valores semilla.

	min	max	semilla
A	-1000	1500	403,40
B	-1000	1000	945,14
C	-1000	-90	-97,00
D	0,241	0,243	0,242

corridas	1000
----------	------

DRobsmmed	352				SSE	SSR			
TDC	DDR	DDR calc	(DRobs-DRcalc)^2	(DRcal-DRprom)^2	ERROR 1	ERROR 2	SST	R2	1-R2
66,55	496	-423,87	847022,61	602097,59	1652019,87	2587807,17	4239827,04	0,61	0,39
53,14	608,685	1275,70	444909,11	853082,97					
46,33	778,102	710,21	4609,35	128260,43					
67,125	178,527	-351,00	280396,28	494311,29					
61	25,673	-237,66	69344,86	347788,89					
60	25	-50,75	5737,66	162266,00					

Se realizaron 1000 corridas para la estimación de los parámetros, aplicando el método de Montecarlo, tal como se indica en la Tabla 30.

Tabla 88. Parámetros seleccionados del modelo estadístico tipo empírico

R2	1-R2	A	B	C	D
0,805	0,195	430,92	264,50	-307,76	0,24

En la Figura 37, se indica el comportamiento del parámetro A, determinado por simulación de Montecarlo, la dispersión de los datos no presenta una tendencia definida.

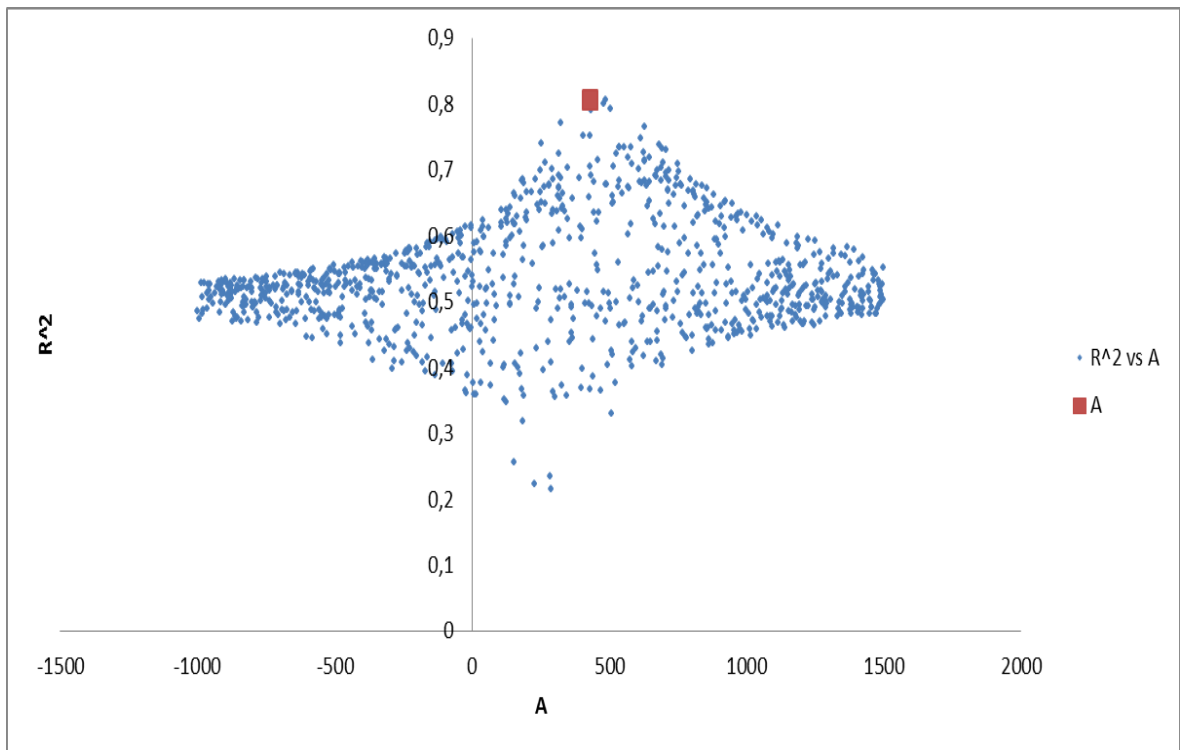


Figura 189. Comportamiento del parámetro A en Montecarlo.

En la Figura 38, se observa el comportamiento del parámetro B determinado por simulación de Montecarlo, la dispersión de los datos no presenta una tendencia definida.

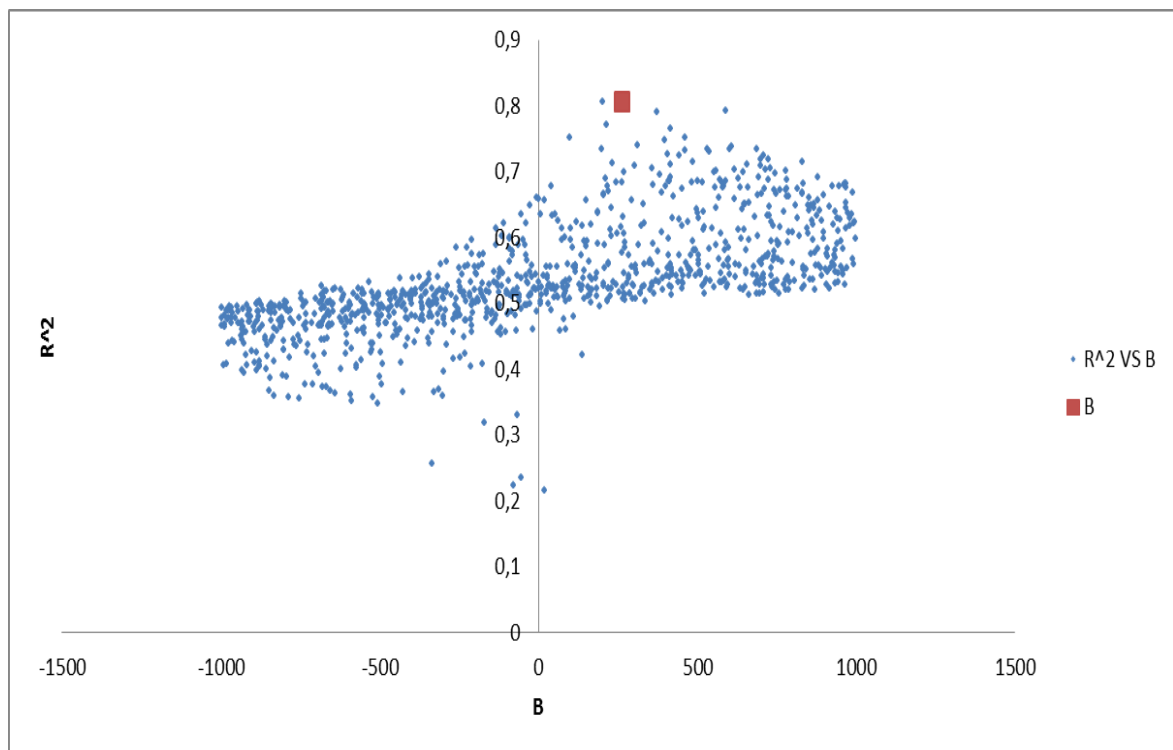


Figura 190. Comportamiento del parámetro B en Montecarlo.

En la Figura 39, se observa el comportamiento del parámetro C determinado por simulación de Montecarlo, la dispersión de los datos no presenta una tendencia definida.

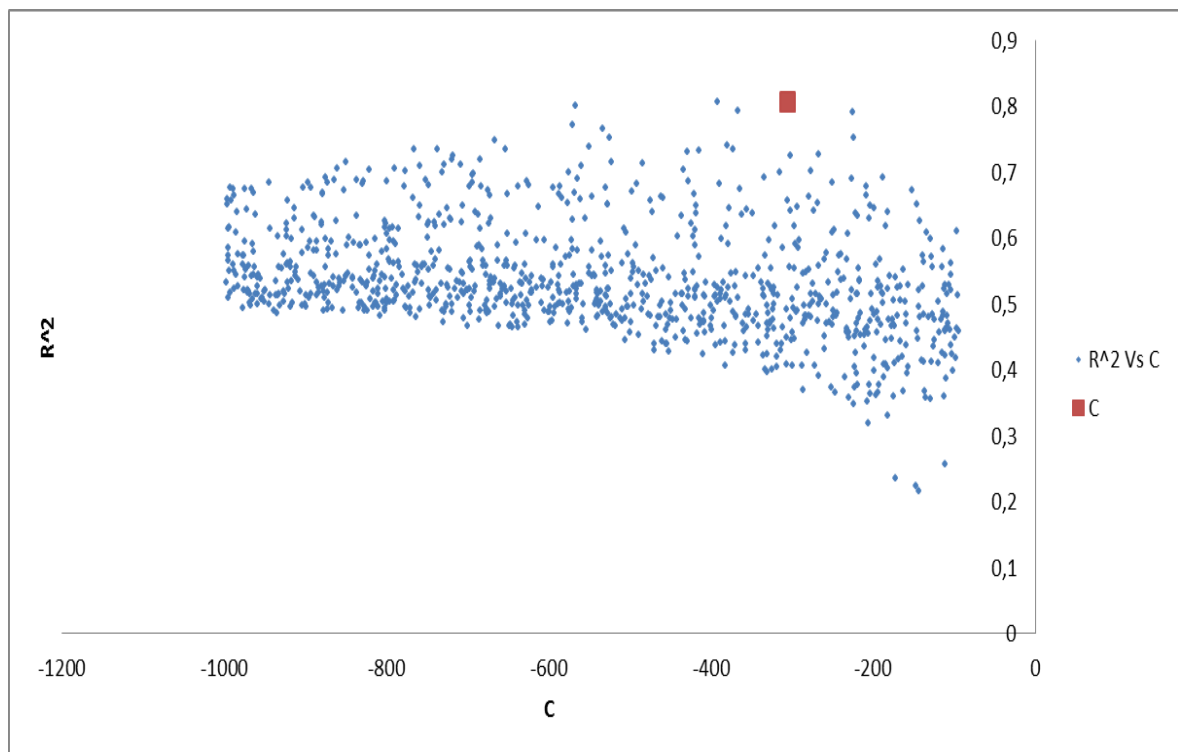


Figura 191. Comportamiento del parámetro C en Montecarlo.

En la Figura 40, se observa el comportamiento del parámetro D determinado por simulación de Montecarlo, la dispersión de los datos no presenta una tendencia definida.

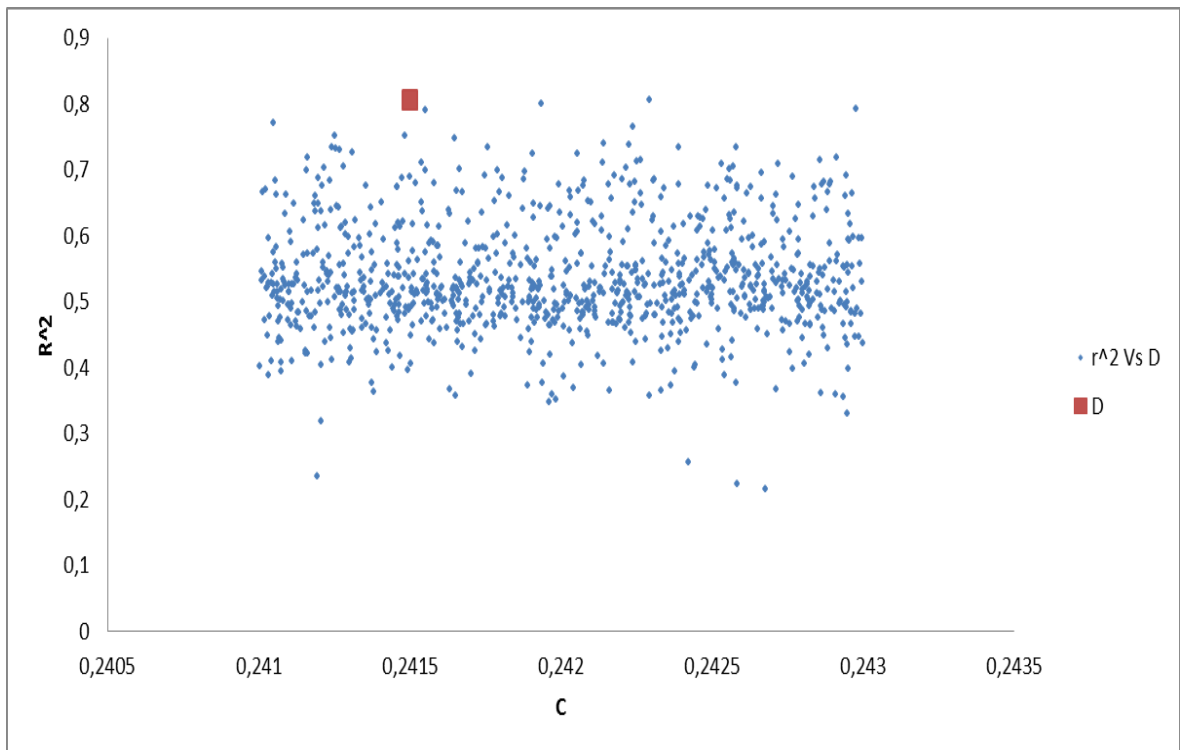


Figura 192. Comportamiento del parámetro D en Montecarlo.

1.3.2.2. Análisis de varianza

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo empírico de regresión no lineal, para describir la relación armónica entre la Diferencia en la distancia relativa (DDR) y la variable independiente tasa de descenso de caudal (TDC).

La ecuación del modelo ajustado es:

$$DDR = 431 + 264.5 * \cos(TDC * 0.242) - 307.6 * \sin(TDC * 0.242) \quad (16)$$

Se determinan los estadísticos para el modelo empírico de la Diferencia en la distancia relativa (DDR), tal como se observa en la Tabla 31.

Tabla 89. Estadísticos del modelo tipo empírico de la DDR

R-Cuadrada = 0,8652 por ciento	
R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 66,31por ciento	
SUMA DE LOS CUADRADOS DEL ERROR=7013	
RAIZ CUADRADA DEL ERROR MEDIO (RMSE)=187,3	

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 86.52% de la variabilidad en DDR. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes es 66.31%. La suma de los cuadrados del error (SSE) es de 7013 y la raíz cuadrada del error medio (RMSE) es de 187,3.

1.3.2.3. Análisis de residuos

En la dispersión de los residuos, se identifica la presencia de un punto con residuo inusualmente grande. Sin embargo, el dato atípico identificado no se elimina, al considerarse un punto influyente en una dispersión de pocos datos, tal como se observa en la Figura 41.

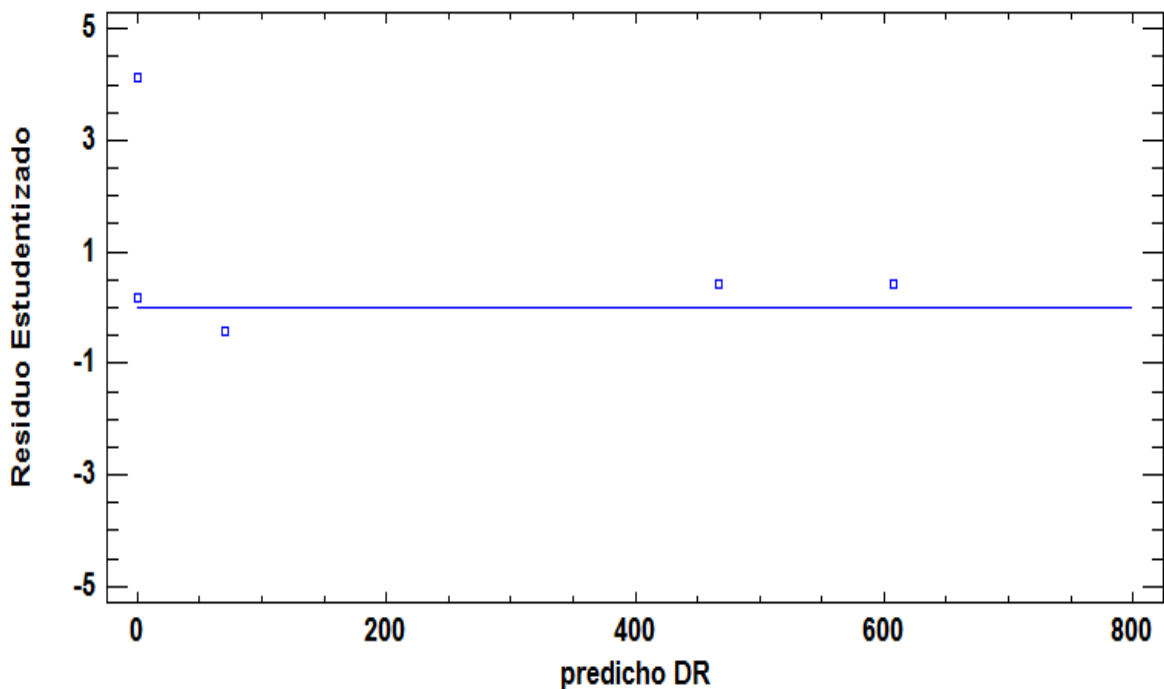


Figura 193. Análisis de residuos para el modelo empírico de la diferencia en la distancia relativa.

1.3.2.4. Tasas de variación

La Tabla 32, indican las tasa de variación de los resultados teóricos y los estimados a través del modelo estadístico tipo empírico para la diferencia en la distancia relativa (DDR).

Tabla 90. Tasa de variación para la diferencia en la distancia relativa.

TDC	DDR	DDR-ESTADISTICO	TASAS DE VARIACION	
			%M TEORICO	% M ESTIMADO
66,55	496	306,059		
53,14	608,685	595,196	-22,60	-94,47
46,33	778,102	788,196	-27,83	-32,43
67,125	178,527	360,800	77,06	54,22
61	25,673	26,795	85,62	92,57
60	25	46,863	2,62	-74,89
			U de Theil	0,380

El indicador U de Theil registra un valor de 0.380, lo que indica un 38% en la desigualdad del valor observado sobre la predicción. En la Figura 42, se observa el diagrama de Theil para el modelo empírico de la diferencia en la distancia relativa.

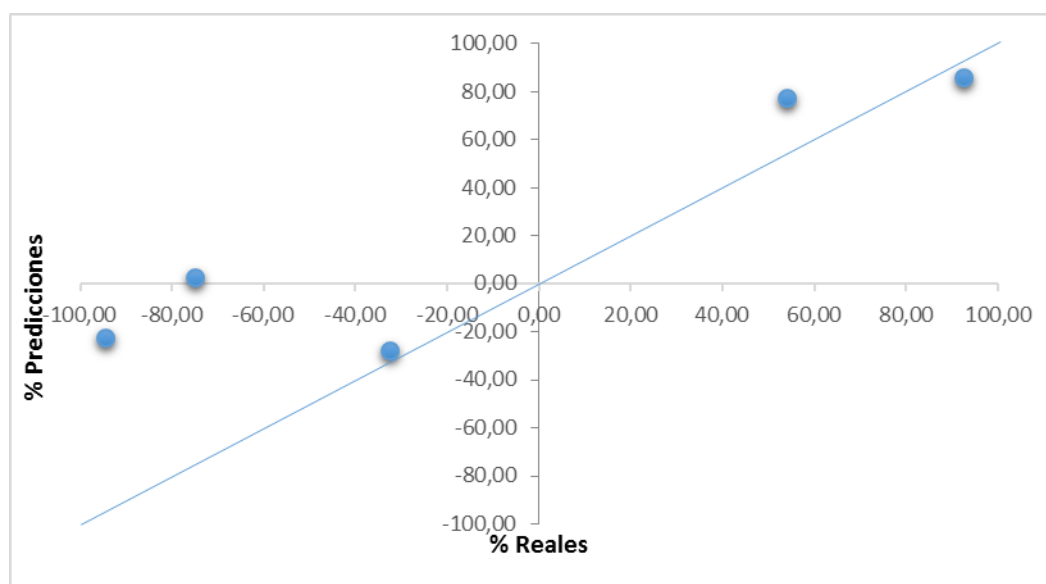


Figura 194. Diagrama de predicción- realización de Theil para el modelo empírico de la DDR.

1.3.2.5. Intervalos de predicción.

Los intervalos de predicción con un 90% de confianza, se establecen para el modelo estadístico tipo empírico de la diferencia en la distancia relativa (DDR), tal como se indica en la Figura 43.

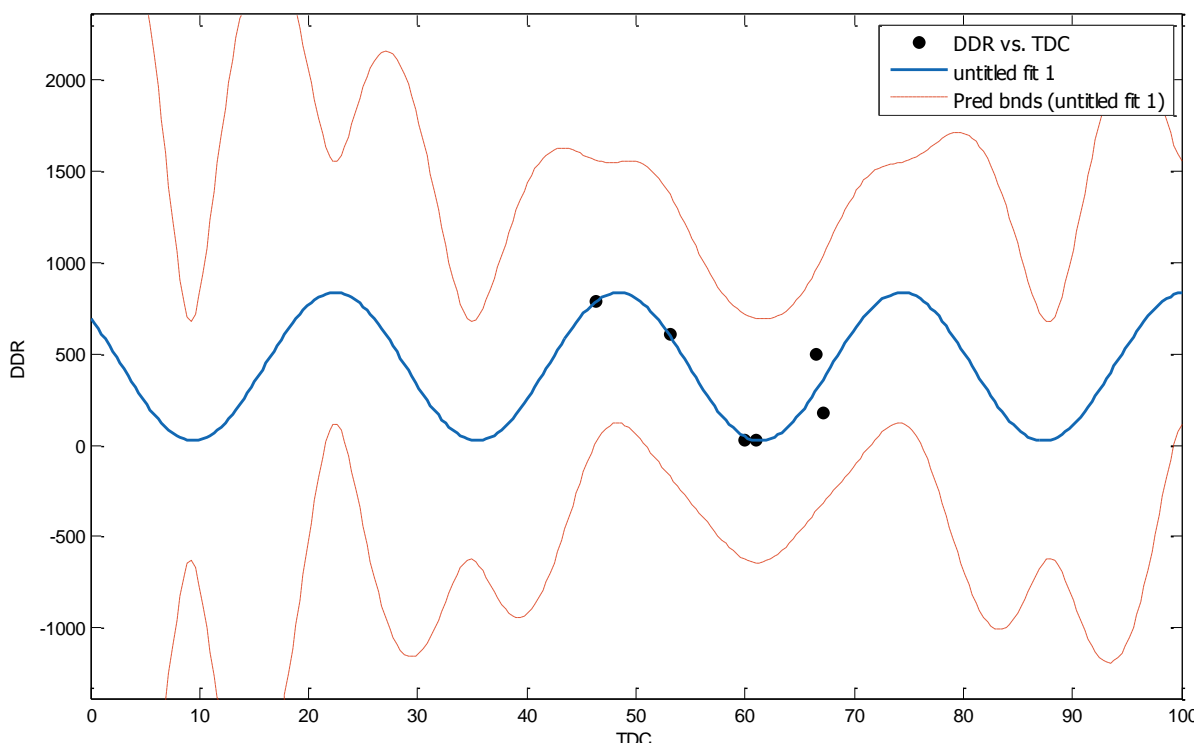
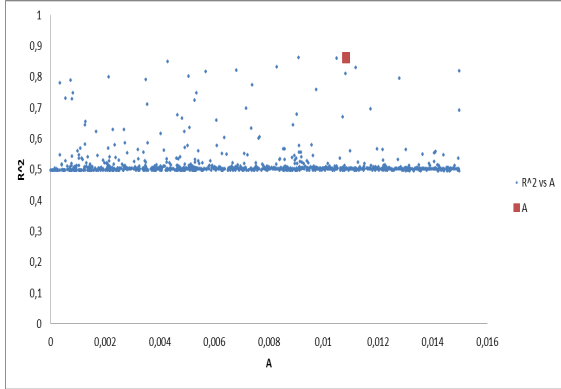
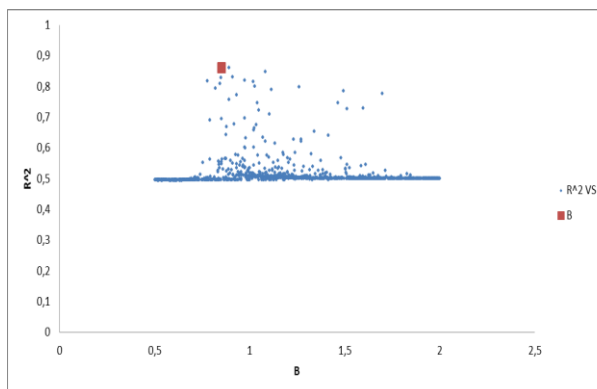
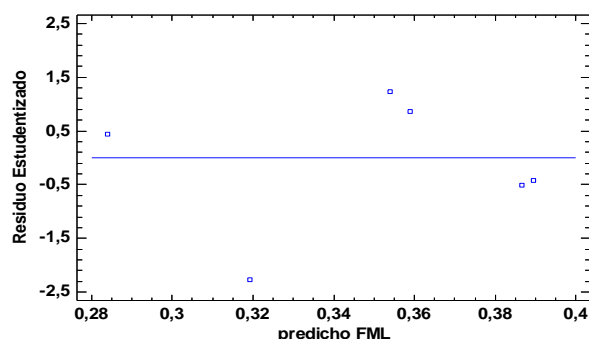
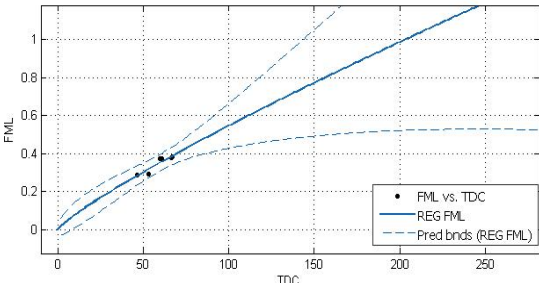
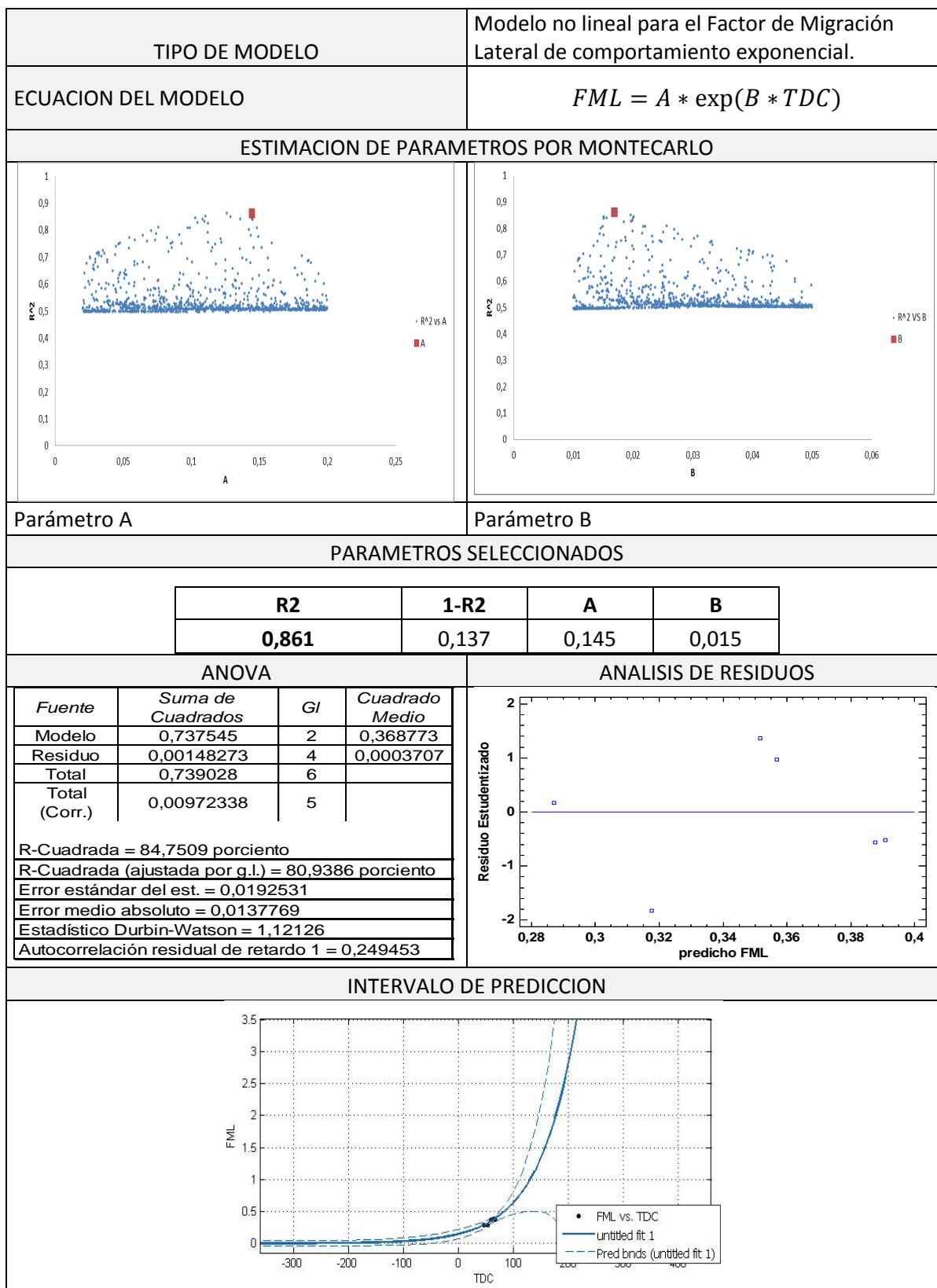
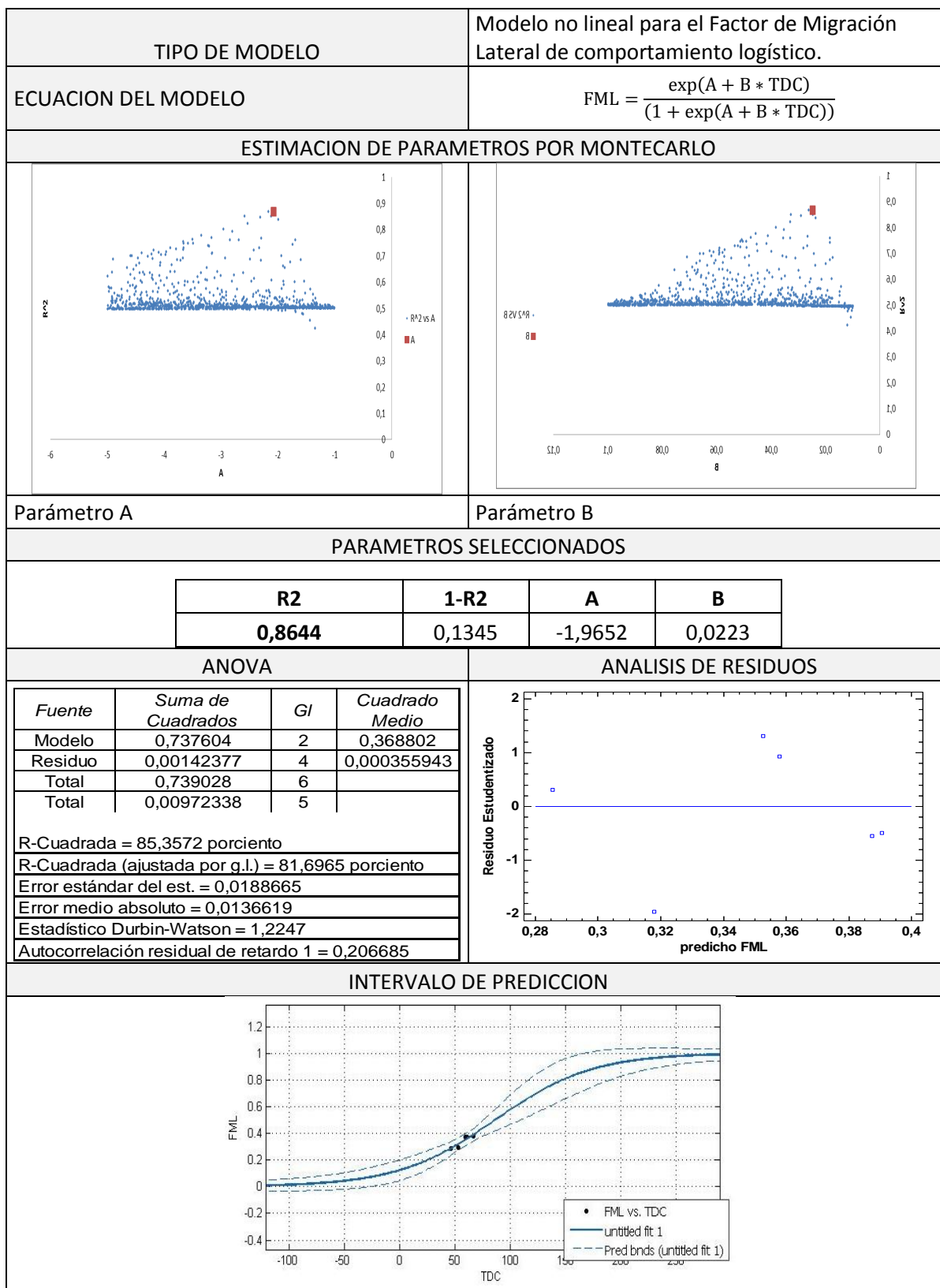


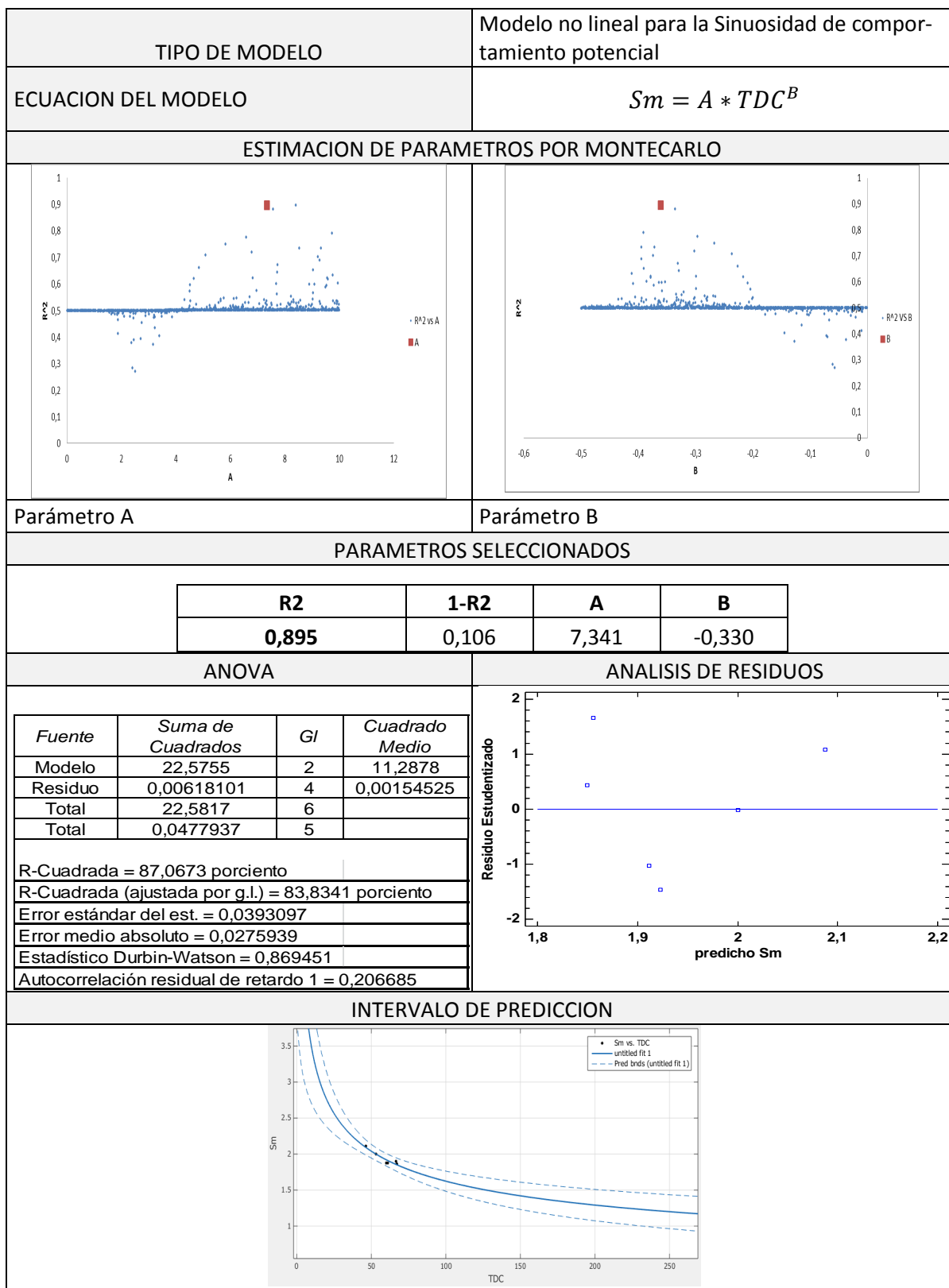
Figura 195. Intervalos de predicción para el modelo tipo empírico de la DDR.

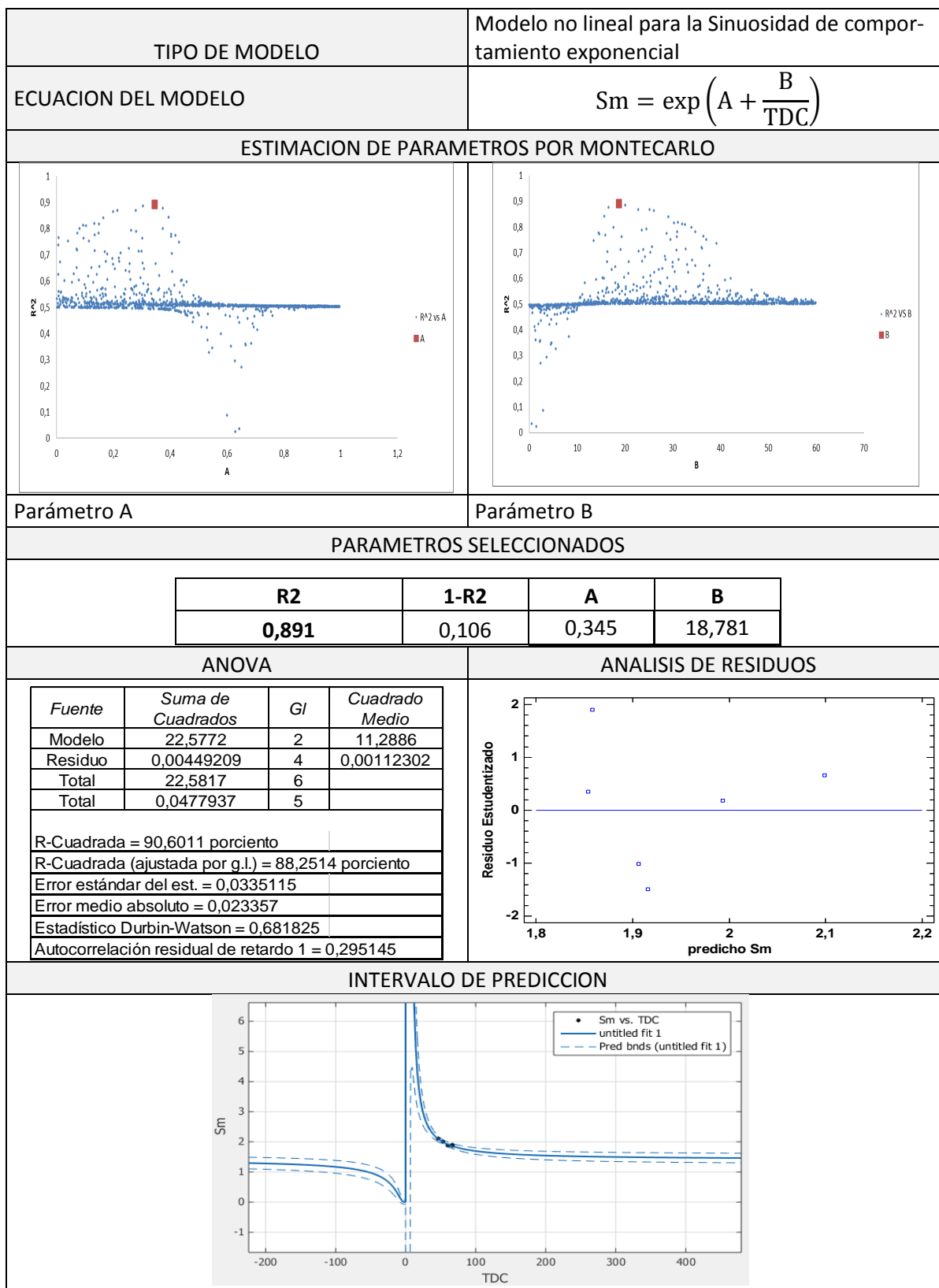
2. TABLAS RESUMENES DE LOS MODELOS NO LINEALES ANALIZADOS

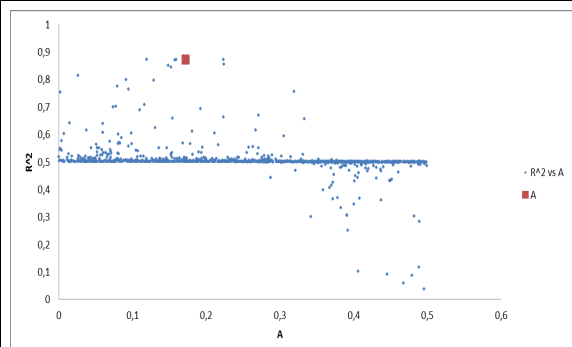
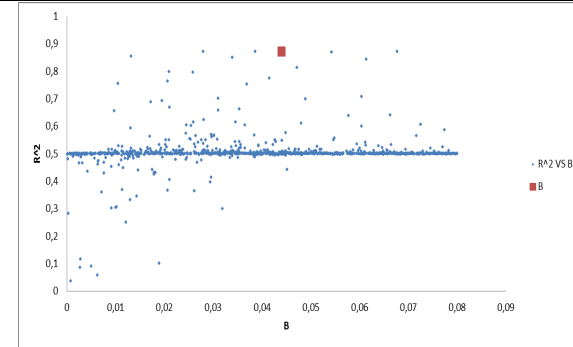
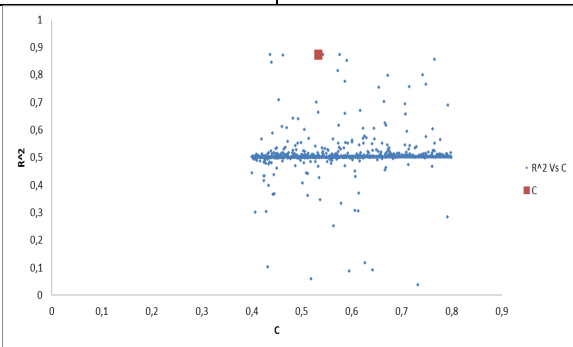
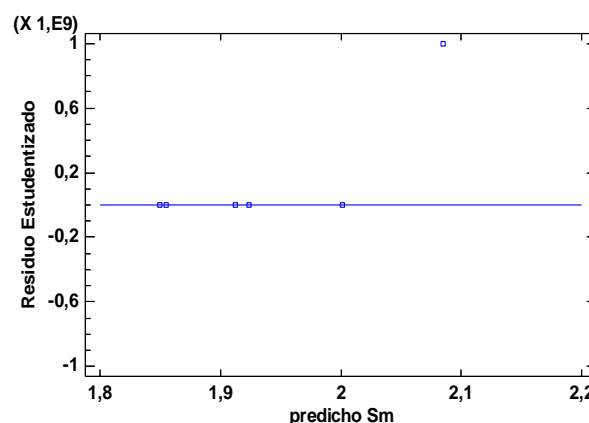
TIPO DE MODELO		Modelo no lineal para el Factor de Migración Lateral de comportamiento potencial																					
ECUACION DEL MODELO		$FML = A * TDC^B$																					
ESTIMACION DE PARAMETROS POR MONTECARLO																							
																							
Parámetro A		Parámetro B																					
PARAMETROS SELECCIONADOS																							
<table><tr><td>R2</td><td>1-R2</td><td>A</td><td>B</td></tr><tr><td>0,8607</td><td>0,1294</td><td>0,0108</td><td>0,8518</td></tr></table>		R2	1-R2	A	B	0,8607	0,1294	0,0108	0,8518														
R2	1-R2	A	B																				
0,8607	0,1294	0,0108	0,8518																				
ANOVA		ANALISIS DE RESIDUOS																					
<table><tr><td>Fuente</td><td>Suma de Cuadrados</td><td>Gl</td><td>Cuadrado Medio</td></tr><tr><td>Modelo</td><td>0,737645</td><td>2</td><td>0,368822</td></tr><tr><td>Residuo</td><td>0,00138318</td><td>4</td><td>0,0003458</td></tr><tr><td>Total</td><td>0,739028</td><td>6</td><td></td></tr><tr><td>Total (Corr.)</td><td>0,00972338</td><td>5</td><td></td></tr></table>	Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Modelo	0,737645	2	0,368822	Residuo	0,00138318	4	0,0003458	Total	0,739028	6		Total (Corr.)	0,00972338	5				
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio																				
Modelo	0,737645	2	0,368822																				
Residuo	0,00138318	4	0,0003458																				
Total	0,739028	6																					
Total (Corr.)	0,00972338	5																					
<table><tr><td>R-Cuadrada = 85,7747 porciento</td></tr><tr><td>R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 82,2184 porciento</td></tr><tr><td>Error estándar del est. = 0,0185956</td></tr><tr><td>Error medio absoluto = 0,0134358</td></tr><tr><td>Estadístico Durbin-Watson = 1,35493</td></tr><tr><td>Auto correlación residual de retardo 1 = 0,158729</td></tr></table>		R-Cuadrada = 85,7747 porciento	R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 82,2184 porciento	Error estándar del est. = 0,0185956	Error medio absoluto = 0,0134358	Estadístico Durbin-Watson = 1,35493	Auto correlación residual de retardo 1 = 0,158729																
R-Cuadrada = 85,7747 porciento																							
R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 82,2184 porciento																							
Error estándar del est. = 0,0185956																							
Error medio absoluto = 0,0134358																							
Estadístico Durbin-Watson = 1,35493																							
Auto correlación residual de retardo 1 = 0,158729																							
INTERVALO DE PREDICCION																							
																							

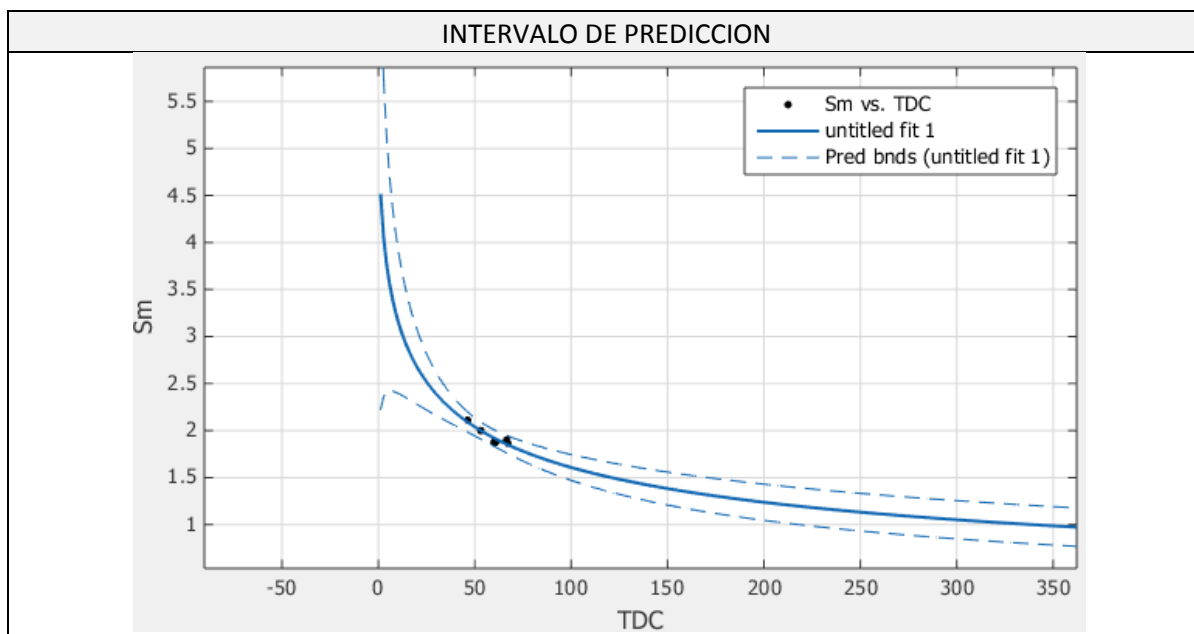


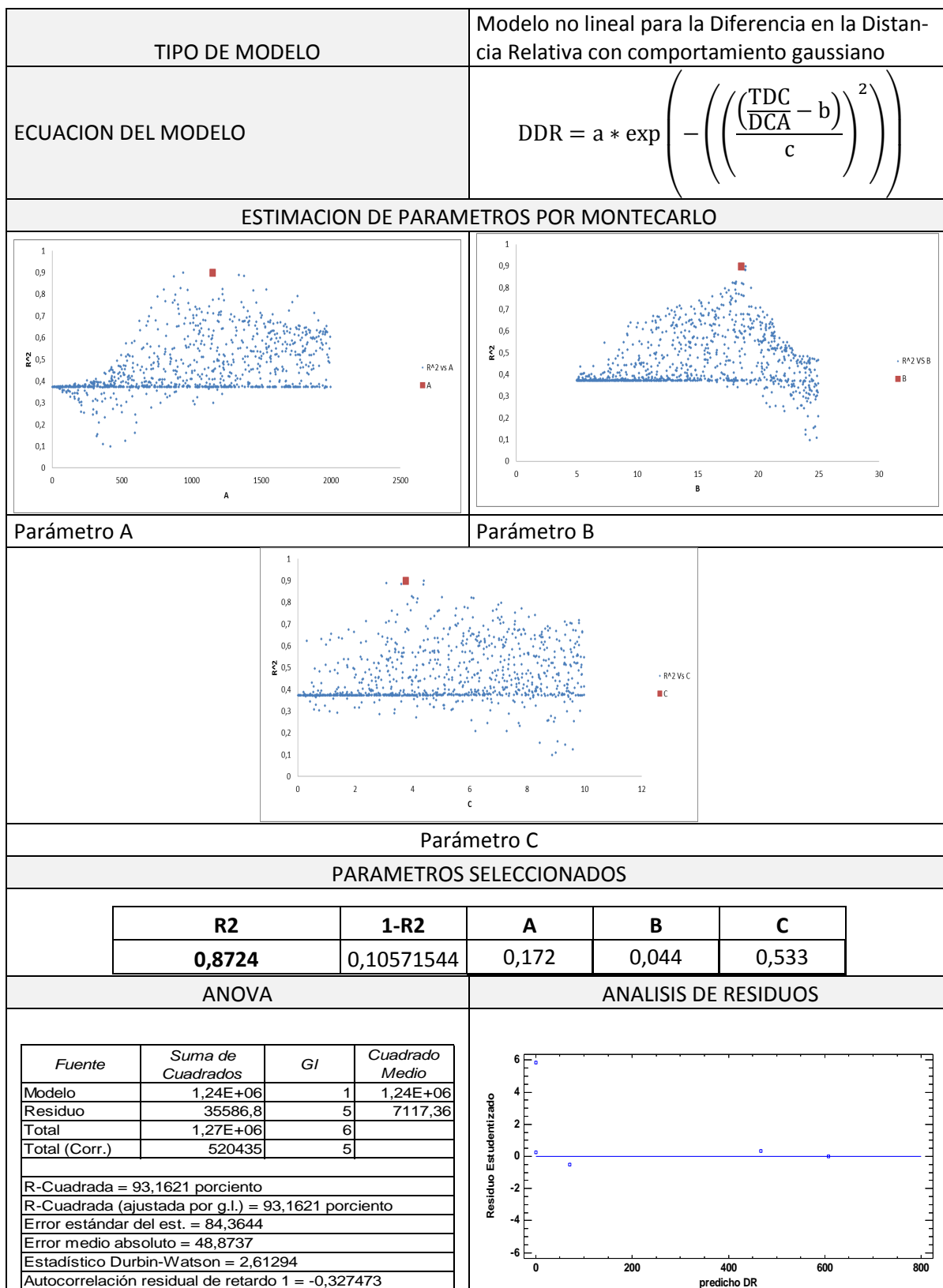


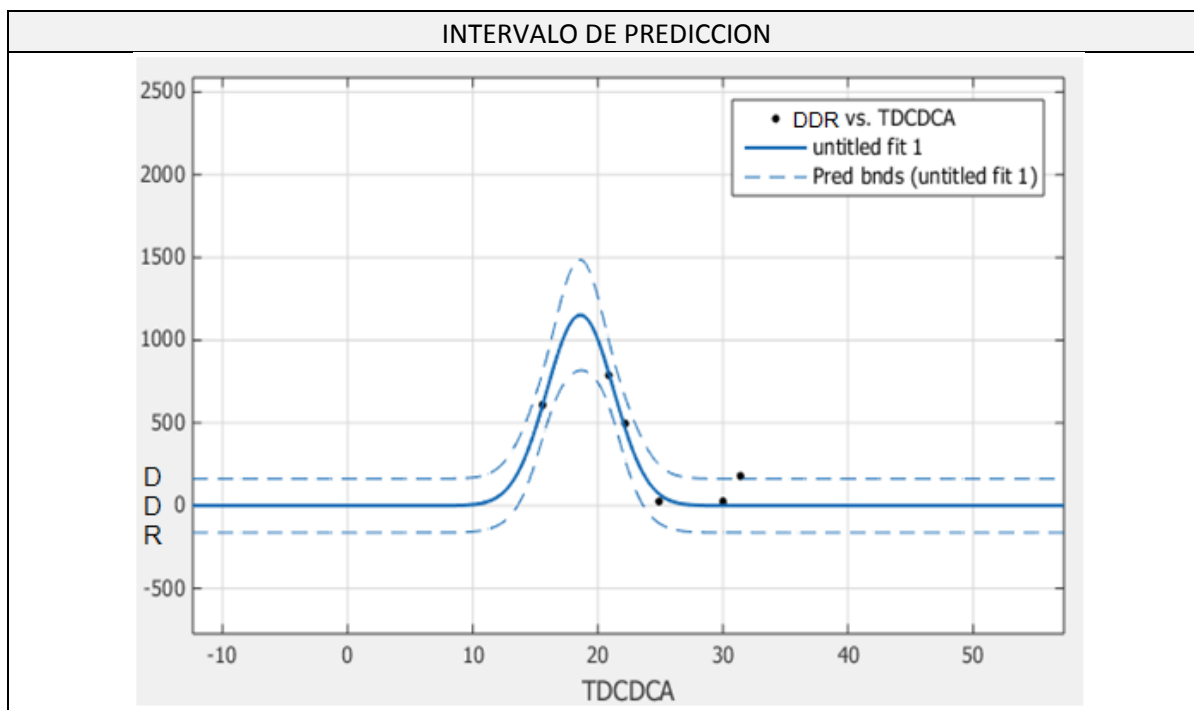


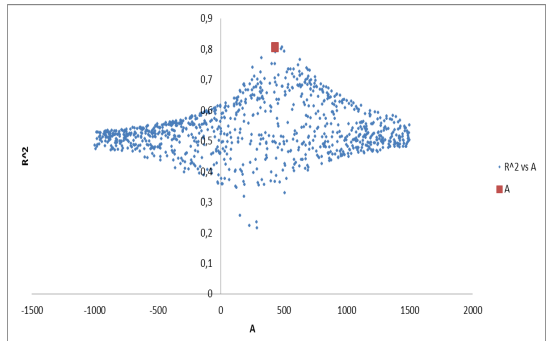
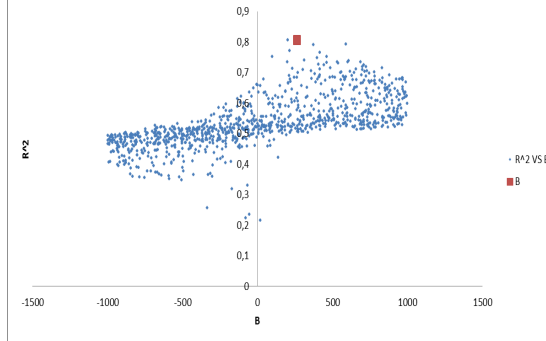
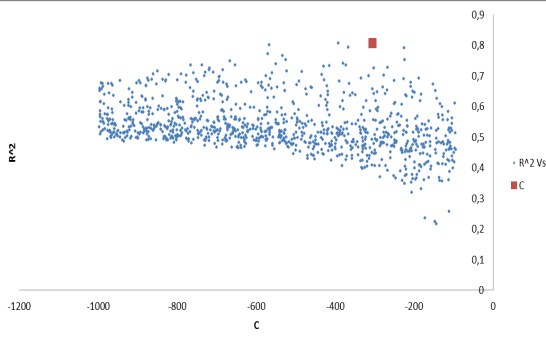
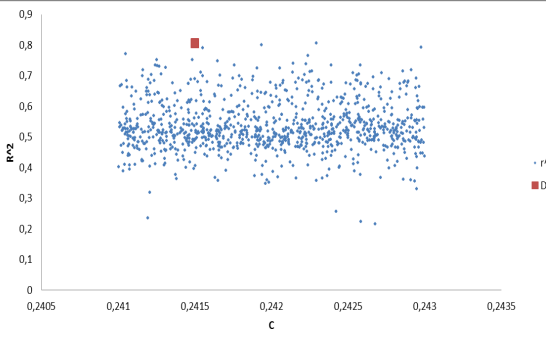
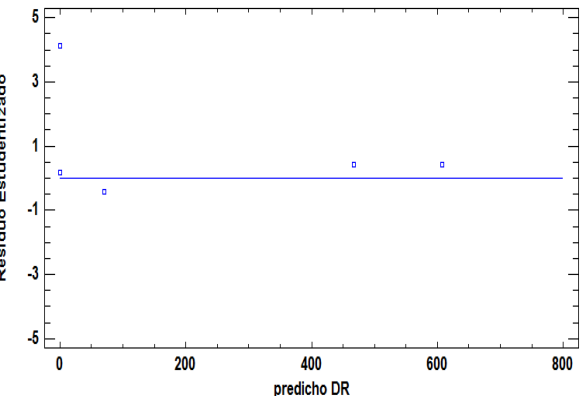


TIPO DE MODELO		Modelo no lineal para la Sinuosidad de comportamiento exponencial tipo 2																					
ECUACION DEL MODELO		$Sm = \left(\frac{1}{A + B * TDC^C} \right)$																					
ESTIMACION DE PARAMETROS POR MONTECARLO																							
																							
Parámetro A		Parámetro B																					
																							
		Parámetro C																					
PARAMETROS SELECCIONADOS																							
<table><tr><td>R2</td><td>1-R2</td></tr><tr><td>0,8724</td><td>0,10571544</td></tr></table>		R2	1-R2	0,8724	0,10571544	<table><tr><td>A</td><td>B</td><td>C</td></tr><tr><td>0,172</td><td>0,044</td><td>0,533</td></tr></table>		A	B	C	0,172	0,044	0,533										
R2	1-R2																						
0,8724	0,10571544																						
A	B	C																					
0,172	0,044	0,533																					
ANOVA		ANALISIS DE RESIDUOS																					
<table><tr><td>Fuente</td><td>Suma de Cuadrados</td><td>Gl</td><td>Cuadrado Medio</td></tr><tr><td>Modelo</td><td>22,5752</td><td>3</td><td>7,52508</td></tr><tr><td>Residuo</td><td>0,00645439</td><td>3</td><td>0,00215146</td></tr><tr><td>Total</td><td>22,5817</td><td>6</td><td></td></tr><tr><td>Total</td><td>0,0477937</td><td>5</td><td></td></tr></table>	Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Modelo	22,5752	3	7,52508	Residuo	0,00645439	3	0,00215146	Total	22,5817	6		Total	0,0477937	5				
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio																				
Modelo	22,5752	3	7,52508																				
Residuo	0,00645439	3	0,00215146																				
Total	22,5817	6																					
Total	0,0477937	5																					
<table><tr><td>R-Cuadrada = 86,4953 por ciento</td><td></td></tr><tr><td>R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 77,4922 por ciento</td><td></td></tr><tr><td>Error estándar del est. = 0,0463839</td><td></td></tr><tr><td>Error medio absoluto = 0,0284099</td><td></td></tr><tr><td>Estadístico Durbin-Watson = 0,887132</td><td></td></tr><tr><td>Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,229179</td><td></td></tr></table>		R-Cuadrada = 86,4953 por ciento		R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 77,4922 por ciento		Error estándar del est. = 0,0463839		Error medio absoluto = 0,0284099		Estadístico Durbin-Watson = 0,887132		Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,229179											
R-Cuadrada = 86,4953 por ciento																							
R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 77,4922 por ciento																							
Error estándar del est. = 0,0463839																							
Error medio absoluto = 0,0284099																							
Estadístico Durbin-Watson = 0,887132																							
Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,229179																							







TIPO DE MODELO	Modelo no lineal para la Diferencia en la Distancia Relativa a partir de función de Fourier																
ECUACION DEL MODELO	DDR = a + b * cos(TDC * d) + c * sin(TDC * d)																
ESTIMACION DE PARAMETROS POR MONTECARLO																	
																	
Parámetro A			Parámetro B														
																	
Parámetro C			Parámetro D														
PARAMETROS SELECCIONADOS																	
<table><tr><td>R2</td><td>1-R2</td><td>A</td><td>B</td><td>C</td><td>D</td></tr><tr><td>0,805</td><td>0,195</td><td>430,92</td><td>264,50</td><td>-307,76</td><td>0,24</td></tr></table>						R2	1-R2	A	B	C	D	0,805	0,195	430,92	264,50	-307,76	0,24
R2	1-R2	A	B	C	D												
0,805	0,195	430,92	264,50	-307,76	0,24												
ANOVA			ANALISIS DE RESIDUOS														
<table><tr><td>R-Cuadrada = 0,8652 porciento</td><td></td></tr><tr><td>R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 66,31porciento</td><td></td></tr><tr><td>SUMA DE LOS CUADRADOS DEL ERROR=7013</td><td></td></tr><tr><td>RAIZ CUADRADA DEL ERROR MEDIO (RMSE)=187,3</td><td></td></tr></table>			R-Cuadrada = 0,8652 porciento		R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 66,31porciento		SUMA DE LOS CUADRADOS DEL ERROR=7013		RAIZ CUADRADA DEL ERROR MEDIO (RMSE)=187,3								
R-Cuadrada = 0,8652 porciento																	
R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 66,31porciento																	
SUMA DE LOS CUADRADOS DEL ERROR=7013																	
RAIZ CUADRADA DEL ERROR MEDIO (RMSE)=187,3																	

